

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉVALUATION DE LA PUISSANCE AÉROBIE MAXIMALE EN NATATION  
(TEST PROGRESSIF MAXIMAL À PALIERS MULTIPLES)

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN KINANTROPOLOGIE  
(PHYSIOLOGIE DE L'EFFORT)

PAR  
KHALID BOUKHAR

JUIN 2015

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à souligner l'implication majeure de mon directeur de recherche, le docteur Alain-Steve Comtois, qui a été une personne fondamentale dans le développement du projet, pendant la phase de rédaction de ce mémoire. J'ai beaucoup apprécié son apport et son soutien inconditionnel, pour avoir su me guider avec patience pendant ce projet de recherche et pour le précieux temps dédié à m'orienter dans la rédaction rigoureuse.

Ma reconnaissance est aussi témoignée au docteur Jean P. Boucher pour la pertinence de ses recommandations méthodologiques, ainsi qu'aux professeurs Laurent Ballaz et Véronique Pépin pour avoir dédié une part de leur temps précieux à agir comme jury, à Carole Roy, pour son assistance technique et son implication active dans la collecte de données, ainsi qu'à Roxane Lemieux et Andrée-Anne Parent pour leurs aides et précieuse collaboration.

Je n'aurai jamais de mots pour exprimer ma reconnaissance envers mes parents et ma famille qui ont toujours été un exemple pour moi et ont manifesté constamment leur encouragement et soutien.

Je veux témoigner ma reconnaissance envers mes filles Salma et Basma qui sont la plus grande force et source de motivation de ma vie et de chaque défi. À mon épouse, Hanaa qui m'a accompagné durant tous mes défis et qui a dû rester toute seule beaucoup de fois à cause de mon travail et de mes études. À ma femme, tous mes remerciements.

Cette étude n'aurait pu être réalisée sans la participation des participants qui ont pris part à l'étude avec beaucoup d'enthousiasme et un maximum d'effort durant tout le protocole expérimental.

## TABLE DES MATIÈRES

Remerciement.....	ii
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	x
Résumé.....	xi
I- CHAPITRE I : INTRODUCTION.....	1
II- CHAPITRE II : CADRE THÉORIQUE.....	2
1. HISTORIQUE.....	2
1.1. Évaluation scientifique en natation sportive.....	2
1.2. Les premiers essais d'évaluation de l'endurance en natation.....	2
1.3. Les premières analyses de gaz.....	3
2. LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE.....	4
2.1. Définition.....	4
2.2. Aspects généraux du fonctionnement du système cardiovasculaire.....	5
2.3. Le débit cardiaque.....	6
2.4. Principes métaboliques à l'exercice appliqués à la consommation d'oxygène.....	7
2.4.1. Volumes pulmonaires.....	7
2.4.2. Échanges gazeux, transport et consommation d'oxygène.....	8
3. CINÉTIQUE DE LA CONSOMMATION D'OXYGÈNE APRÈS L'EFFORT AÉROBIE.....	11
4. CLASSIFICATION DES TESTS DE PMA EN NATATION.....	13
4.1. Mesure directe.....	13
4.1.1. La nage attachée.....	14
4.1.2. La nage libre.....	15



4.1.3. La nage en bassin à courant d'eau continu.....	16
4.2. Mesure indirecte.....	17
4.2.1. Le test de Lavoie (1985).....	17
4.2.2. Le test navette à paliers multiples en natation.....	17
4.2.3. Le test navette intermittent de Water Polo.....	18
4.2.4. Le test de 5 minutes.....	18
4.2.5. Le test du 5 x 200 progressifs.....	19
4.2.6. Le test du 400m.....	19
4.2.7. Le test de 12 min nage libre.....	20
5. L'INFLUENCE DE L'EFFICACITÉ BIOMÉCANIQUE ET LES PARAMÈTRES DE PROPULSION SUR LA PAM.....	20
6. LA RETROEXTRAPOLATION DE LA COURBE DE RÉCUPÉRATION DE L'OXYGÈNE.....	23
6.1. Rétroextrapolation avec Logarithme.....	23
6.2. Rétroextrapolation avec exponentielle.....	28
7. TEST MAXIMAL PROGRESSIF À PALIERS MULTIPLES EN NATATION.....	30
III- CHAPITRE III : METHODOLOGIE.....	35
1. PARTICIPANTS.....	35
1.1. Questionnaire de consentement et directives du pré-test.....	35
1.2. Critères d'inclusions.....	35
1.3. Critères d'exclusions.....	36
2. CONDITIONS EXPÉRIMENTALES .....	36
2.1. Test PAM en natation.....	36
2.2. Test PAM sur ergocycle.....	36
3. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE.....	38
3.1. Mesures anthropométriques.....	38
3.2. Mesure de la fréquence cardiaque.....	38
3.3. Mesure de VO <sub>2</sub> max en natation.....	38
3.4. Mesure de VO <sub>2</sub> max sur ergocycle .....	39

3.5. Variables mesurées avant et pendant les deux tests.....	39
3.6. Variables indépendantes .....	40
3.7. Variable dépendante .....	40
3.8. Analyses statistiques .....	41
4. VALIDATION DE LA MÉTHODE DE RETRO EXTRAPOLATION AVEC ANALYSEUR MÉTHABOLIQUE PORTABLE (K4b2).....	41
4.1. Protocole et déroulement des tests préliminaires.....	41
4.2. Collecte et analyse des résultats.....	42
4.3. Ajustement du protocole expérimental .....	49
5. COLLECTE DES DONNEES ET ANALYSE DES RESULTATS.....	51
5.1. Mesures anthropométriques.....	51
5.2. Protocole expérimental et mesures.....	51
5.3. vitesses de nage et consommation d'oxygène mesuré .....	55
5.4. Comparatif entre VO <sub>2</sub> max sur ergocycle et en natation.....	57
5.5. La consommation maximale d'oxygène et la vitesse maximale du test Progressif en natation.....	57
5.6. La vitesse de nage sur 400m et vitesse maximale du test progressif en Natation.....	58
5.7. vitesse sur 400m et consommation maximale d'oxygène sur test progressif en Natation.....	60
5.8. Spécificité du test et différence en pourcentage (%) entre le VO <sub>2</sub> sur ergocycle et en natation :.....	60
6. DISCUSSION.....	62
IV-CHAPITRE IV: CONCLUSION.....	66
RÉFÉRENCES.....	67

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Appareil servant à mesurer l'apport des jambes lors de différents mouvements de nage (Cureton, 1930).....	2
Figure 2.2 : Volumes pulmonaires. (Tirée de McArdle et al., 2001).....	8
Figure 2.3 : Évolution des paramètres cardio-respiratoires de la population au test aérobie avec la récupération en fonction du temps (Loïc Protin et Walid Salem 2009).....	12
Figure 2.4 : La VO <sub>2</sub> lors de la récupération après un test progressif continu de VO <sub>2</sub> max sur ergocycle (Loïc Protin et Walid Salem 2009).....	13
Figure 2.5 : Montage expérimental pour une épreuve d'évaluation en nage attaché d'après Van Huss et Cureton (1955).....	14
Figure 2.6 : Appareil permettant de suivre le nageur tout au long de son déplacement lors d'un test de nage libre (Lavoie et Léger, 1981).....	15
Figure 2.7 : Représentation schématique d'un bassin à courant d'eau continu (Holmer, 1974).....	16
Figure 2.8 : Courbe typique de VO <sub>2</sub> de récupération pour un sujet montrant les composantes rapide et lente de la courbe. Le panneau A montre tout le tracé linéaire. Le panneau B montre le tracé semi-logarithmique. Syx et r sont l'erreur-type de l'estimation et le coefficient de corrélation entre X et Y. Collection de l'air expiré a commencé au temps zéro de la récupération. ....	24
Figure 2.9 : Courbe typique de récupération O <sub>2</sub> pour un sujet. Collecte de l'air expiré a commencé à 3 secondes après le début de récupération pour permettre au sujet de se connecter à la valve respiratoire après l'exercice .....	26

Figure 2.10 : Corrélation entre la mesure directe de VO<sub>2</sub>max pendant l'effort (exercice) et la VO<sub>2</sub>max obtenu avec la retro extrapolation de la courbe de récupération O<sub>2</sub> (BE). Les données de la 1ère et 2ème série d'expériences ont été combinées (n = 36)..... 27

Figure 2.11 : Consommation d'Oxygene (VO<sub>2</sub>) telle que mesurée ou estimée à différentes puissances en utilisant cinq techniques différentes.....29

Figure 2.12 : Régression linéaire de la mesure directe de VO<sub>2</sub> pendant l'effort (DVO<sub>2</sub>) avec A.VO<sub>2</sub> estimée en utilisant la technique de régression avec mono-exponentiel lissée (SE VO<sub>2</sub>) et B.VO<sub>2</sub> estimé par régression linéaire du premier prélèvement de VO<sub>2</sub> de récupération (LR VO<sub>2</sub>). A:  $y = 0,262 + 0.884 x$  ;  $r = 0,92$ . B:  $y = 0,365 + 1,014 x$  ;  $r = 0,91$  ..... 30

Figure 2.13 : Comparaison des valeurs de crête de la VO<sub>2</sub> pendant la course sur tapis roulant et pendant la nage maximale en utilisant la méthode de retro extrapolation (BE) de la courbe de récupération d'O<sub>2</sub>.....33

Figure 3.1 : Ergocycle Excalibur V2.0, Groningen, Netherlands.....37

Figure 3.2 : Système d'analyse de gaz portable, K4b2, COSMED, Italie.....37

Figure 3.3 : VO<sub>2</sub> pendant les phases de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement par 6 sec) (participant1).....43

Figure 3.4 : VO<sub>2</sub> pendant les phases de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement par 6 sec) (participant 2).....43

Figure 3.5 : VO<sub>2</sub> pendant les phases de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2).....44

Figure 3.6 : VO<sub>2</sub> pendant première phase de récupération (1min) du test PAM Progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2).....44



Figure 3.7 : VO2 pendant la deuxième phase de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2).....	45
Figure 3.8 : VO2 pendant la troisième phase de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2).....	45
Figure 3.9 : VO2 pendant la quatrième phase de récupération (1min) du test PAM Progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp)(participant2).....	45
Figure 3.10 : VO2 pendant la cinquième phase de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2).....	46
Figure 3.11 : VO2 pendant la sixième phase de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2).....	46
Figure 3.12 : VO2 pendant la septième phase de récupération (1min) du test PAMprogressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2).....	47
Figure 3.13 :VO2 pendant la quatrième phase de récupération (1 min) du test PAM progressif intermittent en natation avec courbe de tendance et son équation ainsi que le coefficient de détermination (R2) (prélèvement resp/resp).....	47
Figure 3.14 : Courbes de tendance avec équations et Coefficients de détermination des prélèvements sur les 20 puis 30 premiers secondes de récupération.....	49
Figure 3.15 : Consommation d'oxygène pendant le test maximal progressif à paliers multiple sur ergocycle. (participant 20).....	51
Figure 3.16 : Consommation d'oxygène pendant les périodes de repos 3 sec après les paliers de 2 min d'effort (participant20).....	52



Figure 3.17 : Courbe de tendance de VO <sub>2</sub> des 20 premières secondes de repos suivant le dernier palier atteint par le participant 20.....	53
Figure 3.18 : Consommation d'oxygène absolu sur ergocycle et natation.....	58
Figure 3.19 : VO <sub>2</sub> (ml*kg <sup>-1</sup> *min <sup>-1</sup> ) prédite à partir de vitesse peak TPN 35,8*TPN (m*s <sup>-1</sup> ) + 15,1; r <sup>2</sup> = 0,74, SEE 4,7 ml*kg <sup>-1</sup> *min <sup>-1</sup> .....	59
Figure 3.20 : Vitesse Prédite 400m (m*s <sup>-1</sup> ) à partir vitesse peak TPN 1,17*TPN (m*s <sup>-1</sup> ) - 0,22; r <sup>2</sup> = 0,97, SEE 0,04 m*s <sup>-1</sup> .....	60
Figure 3.21 : Vitesse Prédite 400m (m*s <sup>-1</sup> ) à partir VO <sub>2</sub> peak TPN 0,024*VO <sub>2</sub> peak TPN (ml*kg <sup>-1</sup> *min <sup>-1</sup> ) - 0,16; r <sup>2</sup> = 0,72, SEE 0,14 m*s <sup>-1</sup> .....	60
Figure 3.22 : Illustrations des notions de VO <sub>2</sub> max, VAM et économie pour deux participants différents lors d'une épreuve à paliers multiples.....	61
Figure 3.23 : Consommation d'oxygène (VO <sub>2</sub> max) en natation Vs Ergocycle.....	61
Figure 3.24 : Consommation d'oxygène (VO <sub>2</sub> max) Triathlètes Vs Nageurs.....	65

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Valeurs du débit cardiaque au repos et à l'exercice chez des individus sédentaires et chez des athlètes. (Adapté de Fritz Zintl; 1991).....	6
Tableau 2.2 : Les coefficients de corrélation entre les paramètres de propulsion, Cs, VO2 et $\Delta$ La et les caractéristiques de la composition corporelle chez les jeunes nageurs.....	22
Tableau 2.3 : Comparaison entre les valeurs de VO2max obtenues via la retro extrapolation de la courbe de VO2 pendant la récupération (BE VO2max=x) et la VO2max mesuré pendant l'effort (Exercice VO2max=y) avec les différents protocoles expérimentales.....	25
Tableau 2.4 : Comparaison des valeurs de crête du VO2max, Ve, et R lors de course sur tapis roulant et en natation.....	31
Tableau 2.5 : Puissance aérobie maximale (ml/kg/min) prédite à partir de la vitesse maximale aérobie et de l'indice de mouvement de bras (IMB) (Test maximal progressif à paliers multiples en natation de Leger et Lavoie 1985).....	33
Tableau 3.1 : Retro extrapolation logarithmique comparative de deux courbes de VO2 de récupération : 20 et 30 secondes.....	48
Tableau 3.2 : Récapitulatif des mesures anthropométriques, et discipline sportive pratiqué par les participants.....	54
Tableau 3.3 : Récapitulatif des vitesses atteintes et la consommation d'oxygène absolu et relative.....	56

## RÉSUMÉ

### Objectif :

Le but de cette recherche est d'investiguer le test de puissance aérobie progressif à paliers multiples en natation (Léger 1985) pour vérifier sa fidélité et le degré de validité dans le contexte actuel.

### Méthodologie :

Le groupe des participants était constitué de 15 nageurs et 9 triathlètes dont 7 filles et 17 garçons (âgés de  $22,5 \text{ ans} \pm 8,3$ ) réalisant le 400m nage libre en  $4,57 \text{ minutes} \pm 1,11$ ,  $VAM=(1,39 \text{ m.s}^{-1}) (\pm 0,23)$ . Les participants ont nagé sur des paliers de 2 min à une vitesse prédéterminée suivis d'une minute de repos. La collecte des gaz a eu lieu immédiatement à l'arrêt de l'effort pendant 30 secondes, les 30 secondes restantes de la minute de repos servaient à se replacer à l'extrémité du bassin la plus proche pour reprendre l'effort sur le palier suivant. Le test était constitué de 3 à 4 paliers d'effort d'une durée de 2minutes chacun après 1000m d'échauffement. La vitesse initiale a été fixée de 0.20 m/s plus lente que la vitesse moyenne du meilleur 400m de chaque participant et était augmentée de 0.05 m/s à chaque palier. Le participant était arrêté aussitôt qu'on remarque qu'il n'était plus capable de nager à la vitesse imposée par la bande sonore (selon le protocole du test maximal progressif à paliers multiples en natation de Leger et Lavoie 1985) (TPN). 48 heures après, Les participants ont pédalé sur un vélo électromagnétique à une fréquence de pédalage de 60 révolutions par minute avec une charge initiale de 0.5 KP (25 watts). L'intensité de l'exercice était augmentée de 0.5 KP toutes les 2 minutes jusqu'à épuisement du participant. Il retourna à la première intensité pour faire un retour au calme de 3 minutes.

### Résultats :

Nous avons constaté un bon niveau de corrélation ( $r^2=0,74$ ) avec une supériorité des valeurs de  $VO_{2Nat}$ . (Moyenne : 4376,72 ml/min) par rapport aux valeurs de  $VO_{2Erg}$ .

(Moyenne : 3795,75 ml/min). Cela est dû à l'aspect spécifique du test de natation. La corrélation existe entre la consommation d'oxygène ( $VO_{2peak}$ ) et la vitesse aérobique maximale (VAM) en natation ( $r^2 = 0,74$ , SEE 4,7 ml\*kg<sup>-1</sup>\*min<sup>-1</sup>). Aussi, nous avons eu une très forte corrélation entre la vitesse moyenne de la meilleure performance sur 400m crawl des participants et la vitesse du dernier palier complété lors du TPN ( $r^2 = 0,97$ , SEE 0,04 m\*s<sup>-1</sup>).

#### Conclusion :

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire de maîtrise ont permis de confirmer la validité et surtout la fidélité du test progressif à paliers multiples en natation (Léger 1985) (TPN) dans le contexte actuel.

#### Mots clefs :

Le test de puissance aérobique progressif à paliers multiples en natation,  
la rétro extrapolation de la courbe de la  $VO_2$  lors de la récupération, la vitesse aérobique maximale en natation

## CHAPITRE I

### INTRODUCTION

La puissance aérobie maximale (PAM) est depuis longtemps un déterminant de la performance direct ou indirect dans presque tous les sports, et particulièrement dans les sports ou disciplines à prédominance aérobie. Son évaluation, et les modalités d'administration varient en fonction de la discipline, le contexte et les participants évalués. En natation sportive, la puissance aérobie maximale (PAM) a fait l'objet de plusieurs recherches, qui essayaient de concevoir l'outil de mesure le plus valide et fidèle pour évaluer cette composante; à savoir : Huss et Curton, 1955, Magel et coll., 1974, Astrand et Englesson, 1972, Montpetit et coll., 1981, Cazorla et coll., 1982, Lavoie et Léger, 1985. Les techniques de mesure et les concepts ont évolué suivant l'évolution de la technologie, des techniques de nage et des performances ainsi que des besoins en information. Des questions se posent pour conditionner l'outil de mesure et sa conception, à savoir;

- Dans quelle discipline, va-t-on utiliser l'outil de mesure ?
- Que veut-on comme information, et qui va l'utiliser ?
- Quelle clientèle mesurons-nous ?

Ces questions basiques, et fondamentales font remettre en question les tests existants, et nous ont incités à notre tour à approcher la mesure de la PAM en natation avec une vue critique et analytique. Nous nous attarderons dans cette étude sur le test maximal progressif à paliers multiples de Lavoie 1985. Ce test est considéré comme une bonne référence en mesure de la PAM.

Nous tenterons d'investiguer ce test au niveau de l'analyse des gaz, sachant que le test de Lavoie 1985 utilisait une rétro-extrapolation de la courbe de récupération d'oxygène. Aussi, nous considérons que l'évolution technique et des performances sur les derniers 25 ans méritent une remise en contexte et une vérification de la corrélation avec les tests déjà répertoriés



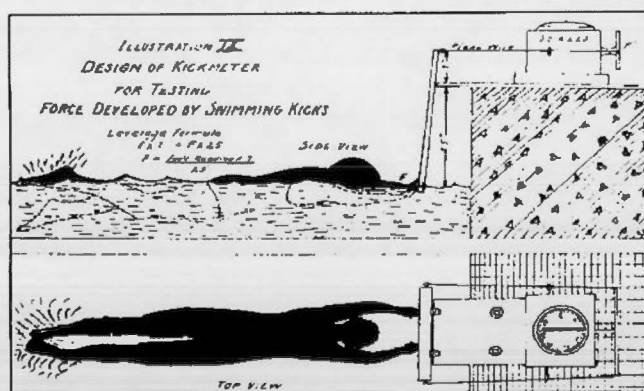
## CHAPITRE II

### CADRE THÉORIQUE

#### 1. HISTORIQUE

##### 1.1. Évaluation scientifique en natation sportive

La recherche scientifique dans le domaine de la natation débuta vers 1930. Avant cette période, il n'y a eu que quelques publications dignes d'intérêt (Dubois-Reymond, 1905; Liljestrand et Stenstrom, 1919). L'utilisation d'instruments mécaniques et électroniques pour l'évaluation en natation a connu son véritable essor vers 1930 avec Thomas K. Cureton. Celui-ci développa un appareil appelé « Kickmeter » qui avait pour fonction de mesurer l'efficacité de la propulsion des membres inférieurs (Cureton, 1930). Peter J. Karpovich contribuera lui aussi à populariser l'utilisation d'appareils techniques spécifiques en natation. Dans ses travaux réalisés sur la résistance de l'eau, Karpovich présenta un montage qu'il appela le « Resistograph » (Karpovich, 1933).



Figur2.1 : Appareil servant à mesurer l'apport des jambes lors de différents mouvements de nage (Cureton, 1930)

##### 1.2. Les premiers essais d'évaluation de l'endurance en natation

En 1935, suite aux observations réalisées lors des Jeux olympiques de Los Angeles, Curton commença à soupçonner l'importance de la PAM sur la performance en natation. Il remarqua que la plupart des vainqueurs étaient les athlètes qui avaient une constance dans le rythme de nage tout au long des épreuves. Associant cette observation avec l'endurance organique, il entreprit la mise sur pied d'un test simple mesurant ce

paramètre. L'épreuve débutait par une nage chronométrée de 60 pieds (18,3 mètres) à vitesse maximale, suivie d'une période de repos de 15 minutes. Après la pause, les participants devaient nager une distance de 100 verges (91 mètres) de la façon suivante :

- La première longueur de piscine (25 verges) devait être nagée le plus rapidement possible et les autres 3 autres longueurs (75 verges) au meilleur de la capacité du participant. Chaque longueur (25 verges) était chronométrée.
  - L'évaluation de l'endurance du participant était calculée à partir d'une équation impliquant la diminution de la vitesse à chaque longueur de piscine.
- Bien qu'intuitivement Cureton ait eu raison de croire que l'endurance organique est un facteur important, les arguments avancés démontrent que les processus énergétiques n'étaient pas encore explorés et maîtrisés par les scientifiques de la période.

### 1.3. Les premières analyses de gaz

Karpovich, qui s'intéressait lui aussi aux processus organiques reliés à la natation, entreprit l'expérimentation d'une épreuve visant à prédire les temps de nage pour différentes distances (Karpovich et Le Maitre, 1940). Ce test basé essentiellement sur l'analyse des besoins en oxygène, consistait à nager deux distances, soit 36,6 et 55 mètres. Les deux distances devaient être nagées en gardant le même rythme. Les participants ne devaient pas respirer le long de l'épreuve, les gaz expirés étaient recueillis dans des sacs de Douglas durant 30 à 45 minutes immédiatement après l'effort. Cette procédure visait à mesurer la dette d'oxygène, qui était considérée à l'époque comme un indicateur du coût énergétique. La production d'une dette d'oxygène élevée relève avant tout des processus anaérobies (Dill et Saitor, 1962). Aussi, prédire le temps de course pour des distances supérieures à 400 mètres à partir d'une distance de 55 mètres semble risqué. Dans cette étude, la durée du test variait de 45 à 51 secondes. Or, si un effort maximal est maintenu environ 1 minutes, l'apport énergétique provenant des processus anaérobies est de l'ordre de 70 % (Astrand et Rodahl, 1973). Comme les processus physiologiques interviennent de façon très différente selon la durée et l'intensité de l'exercice, il est pour le moins osé de prédire un temps pour une distance de 400m, basé sur une épreuve de seulement 55m. À partir de 1940 et jusqu'à la fin des années 50, la recherche en natation était dictée par les événements de la Seconde Guerre mondiale. Durant cette période, peu de chercheurs s'intéressaient à la natation comme discipline sportive, mais comme technique de combat et de survie en milieu aquatique.

Après 1960, les chercheurs se penchèrent sur l'évaluation des processus aérobie en natation, mais cette fois avec une approche analytique dans l'objectif d'explorer le côté performance humaine pour des fins plus sportives.

## 2. LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGÈNE

### 2.1 Définition

La notion de « consommation maximale d'oxygène » ( $VO_{2max}$ ) a été définie pour la première fois par Hill et Lupton (1923) dans les années 1920 comme le plus haut débit auquel l'oxygène peut être prélevé et utilisé par l'organisme lors d'un exercice d'intensité élevée. Le paradigme de l'existence d'une consommation maximale d'oxygène a été établi à l'époque en considérant :

- qu'il existe une limite haute de la valeur de  $VO_2$
- qu'il existe des différences interindividuelles de  $VO_{2max}$
- qu'une haute valeur de  $VO_{2max}$  est requise pour atteindre un haut niveau de performance dans les activités de course de moyenne et de longue durée,
- que la valeur de  $VO_{2max}$  est limitée par la capacité du système cardiovasculaire à transporter l'oxygène jusqu'aux muscles actifs.

En 1924, Hill et coll. ont mesuré la  $VO_{2max}$  chez un participant, auquel il était demandé de courir de plus en plus vite. Les résultats ont révélé que la valeur de  $VO_2$  atteinte pour une allure de 243m/min n'était pas dépassée lorsque la vitesse était augmentée à 259, 267, 271 voire 282m/min. Ces auteurs ont conclu qu'à des allures de course élevées, la  $VO_2$  atteinte a une valeur maximale qu'il n'est pas possible de dépasser, même en augmentant l'intensité de l'exercice.

Aujourd'hui, il est universellement accepté qu'il existe une limite physiologique supérieure de la capacité de l'organisme à consommer de l'oxygène. Åstrand et Saltin (1961) ont montré lors d'un protocole discontinu qu'il n'est pas possible de dépasser cette valeur maximale de  $VO_2$  en augmentant l'intensité d'exercice. Ces résultats ont révélé que la cinétique de  $VO_2$  est modifiée par l'intensité d'exercice, de sorte que plus celle-ci est élevée, plus la  $VO_{2max}$  est atteinte rapidement. Pour autant, quelle que soit l'intensité d'exercice imposée, cette valeur maximale reste identique. Cette découverte

avait été prédite par Hill et Lupton (1924), qui avaient postulé que « ...quelle que soit la vitesse (ou la charge de travail) imposée au-delà de cette limite, aucune augmentation supplémentaire de la consommation d'oxygène ne peut se produire ». Cette limite supérieure est principalement déterminée par le volume d'éjection systolique maximal, le volume sanguin total, la densité capillaire et la densité mitochondriale des muscles actifs dans l'activité sportive de référence (Costill et coll. 1976). De tous, le facteur limitant principal est le volume d'éjection systolique (Coyle et coll. 1986; Ekblom et Hermansen 1968).

## 2.2 Aspects généraux du fonctionnement du système cardiovasculaire

Les artères conduisent le sang riche en oxygène vers les tissus. Celles-ci sont constituées de tissus conjonctif et musculaire lisses. Le sang qui passe du ventricule gauche à l'aorte, aboutit en petites branches artérielles, qui sont appelées artérioles, lesquelles sont réparties dans l'organisme. Les parois des artérioles se contractent ou se relâchent pour réguler le débit sanguin périphérique dans le circuit vasculaire. Cette fonction de redistribution est très importante au cours d'un exercice physique, car elle permet de priver temporairement certaines régions corporelles au profit de muscles actifs. L'extensibilité et l'élasticité de la paroi artérielle au cours d'un cycle cardiaque peuvent être perçues dans le « pouls », caractéristique de toute artère superficielle. Chez les personnes en bonne santé, la fréquence de pouls et la fréquence cardiaque sont identiques. La pression artérielle est définie de la façon suivante:

**Pression sanguine = Débit cardiaque \* Résistance périphérique**

La pression systolique au repos est normalement de 120 mm Hg (16 kPa). Celle-ci fournit un indice du travail cardiaque et de la résistance de la paroi artérielle au cours d'une contraction ventriculaire. Pendant la phase de relaxation du cycle cardiaque ou diastole, la pression artérielle descend jusqu'à 70 à 80 mm Hg. (9,3 -10,6 kPa). La pression diastolique est un indice de la résistance périphérique, c'est-à-dire de la facilité d'écoulement du sang des artérioles vers les capillaires. Lorsque la résistance périphérique est élevée, la pression dans les artères ne s'atténue pas et demeure élevée sur une longue période du cycle cardiaque. La force moyenne exercée par le sang contre les parois artérielles au cours d'un cycle cardiaque s'appelle Pression artérielle moyenne (Pam) et elle est estimée par l'équation suivante:  $P_{am} = P_{diastolique} + (0,333 (P_{systolique} - P_{diastolique}))$ . Au cours d'un effort, la pression systolique augmente



beaucoup plus que la pression diastolique et, comparativement à la valeur de repos, le débit cardiaque peut s'accroître de 6 à 8 fois. Par conséquent, la résistance périphérique peut diminuer considérablement.

### 2.3 Le débit cardiaque

Le débit cardiaque (Q) est défini comme le produit de la fréquence cardiaque (FC) par le volume d'éjection systolique (VES) tel que défini par l'équation suivante :

$$Q = FC * VES$$

Au repos (FC = 70 bat.min<sup>-1</sup>), la quantité de sang pompée représente environ 5 L / min, les femmes ayant une valeur d'environ 25% inférieure, essentiellement causée par leur différence de gabarit comparativement aux hommes (Tortora & Derrickson, 2007). Ainsi, chez un individu masculin non entraîné, on estime que le VES représente environ 70 ml par battement alors que chez un athlète (FC = 50 bat/min), le VES sera d'environ 100 ml par battement. Chez les athlètes d'endurance, l'entraînement augmente la sensibilité du nœud sinusal à l'acétylcholine, hormone parasymphatique dont l'effet est de ralentir la fréquence cardiaque (Tableau 2.1). En plus, il y a une réduction de l'activité sympathique au repos, ce qui explique en partie, la FC moins élevée rencontrée chez de nombreux athlètes d'endurance.

Tableau 2.1 : Valeurs du débit cardiaque au repos et à l'exercice chez des individus sédentaires et chez des athlètes. (Adapté de Fritz Zintl; 1991)

Situation	Repos		
	Volume d'éjection systolique ml	FC (batt*min)	Débit Cardiaque ml
Sédentaire	70	70	5000
Athlète	105	45	5000
Exercice maximal			
Sédentaire	120	170-180	20000 - 22000
Athlète	200	180-190	36000 - 38000
(Adapté de Fritz Zintl; 1991)			



## 2.4 Principes métaboliques à l'exercice appliqués à la consommation d'oxygène.

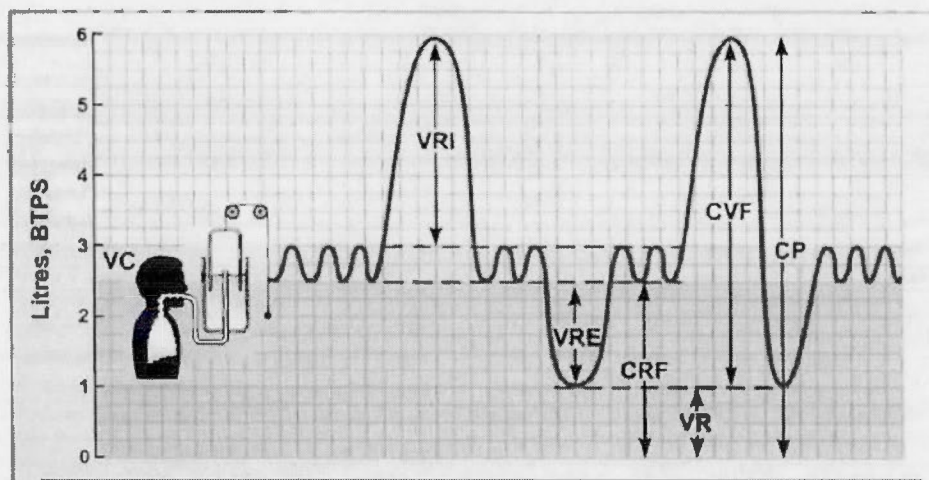
Il existe plusieurs facteurs qui peuvent affecter la puissance aérobie maximale (PAM) : le type d'exercice, l'hérédité, le niveau d'entraînement, le sexe, la composition corporelle et l'âge notamment (Zintl, 1991). Chez la femme non entraînée, les valeurs maximales pour la  $\text{VO}_2\text{max}$  s'obtiennent généralement vers l'âge de 14 à 16 ans et chez les hommes entre 18 à 20 ans (Platonov, 1991). Parmi les hommes sédentaires âgés de 20 à 30 ans, on rapporte des valeurs de  $\text{VO}_2\text{max}$  de près 3300 ml/min  $\pm$  200 ml/min alors que chez les femmes elles se situent plutôt autour de 2000 ml/min-(valeurs relatives entre 40-50 ml/kg/min chez les hommes et entre 32-40 ml/kg/min chez les femmes).

Puisque l'objectif de cette étude est d'évaluer la  $\text{VO}_2$  en natation en comparaison avec la consommation d'oxygène sur ergocycle, il apparaît opportun de décrire de façon détaillée le processus du transport d'oxygène qui détermine le  $\text{VO}_2$  et par extension, le  $\text{VO}_2\text{max}$ . D'autre part, il est également important de faire référence à la mécanique respiratoire (i.e. différents volumes pulmonaires), laquelle réfère à la quantité d'air mobilisée par les poumons au moment de la respiration qui comprend l'expiration et l'inspiration.

### 2.4.1 Volumes pulmonaires

Lors de la respiration, différents types de volumes pulmonaires peuvent être mis à contribution : Le volume courant (VC) est mobilisé au moment d'une inspiration ou d'une expiration normale et sa valeur courante se situe entre 400 ml et 1 l. Le volume expiratoire de réserve (VER) correspond à la quantité d'air qu'il est encore possible d'expulser par une expiration forcée après une expiration normale. Il est d'environ 0,7 litre chez la femme et 1,3 litre chez l'homme. Le volume inspiratoire de réserve (VIR) représente le volume maximum d'air qu'un individu peut inspirer en plus de l'inspiration normale de repos. Elle représente 2 l chez la femme et 2,5 l chez l'homme. Le volume résiduel (VR) représente la quantité d'air qui reste dans les poumons après une expiration forcée (au cours de laquelle un individu éjecte avec force l'air qui lui reste dans les poumons). Sa valeur normale est de 1,0 à 1,2 l chez la femme et de 1,2 à 1,4 l chez l'homme. Finalement, la capacité vitale (CV) est le volume d'air maximal qui peut être expiré après une inspiration maximale. Celle-ci inclut le volume courant (VC) et les volumes de réserve expiratoire et inspiratoire (Tortora & Derrickson, 2007). Bien que les

valeurs de la capacité vitale varient considérablement avec la taille corporelle et la position du corps pendant la mesure, les valeurs moyennes sont de 4 à 5 l chez des jeunes hommes sains et de 3 à 4 l chez les jeunes femmes (Figure 2.2).



chaque battement de cœur par unité de temps (en minutes). Le DC est par définition déterminé par le produit des battements de cœur (la fréquence cardiaque) et la quantité de sang éjectée par battement (volume d'éjection systolique).

$$\text{Formule de Fick : } VO_2 = FC \times VES \times (CaO_2 - CvO_2)$$

La  $VO_2$  max renseigne sur l'aptitude du système ventilatoire, cardiovasculaire et musculaire à prélever l' $O_2$  de l'air ambiant, à l'acheminer aux muscles actifs et à l'utiliser pour resynthétiser l'ATP nécessaire à l'exercice. De ce fait, il est considéré comme un bon témoin de l'efficacité maximale de la fonction cardiorespiratoire chez le participant sain (Dufour, 2005). Lors d'une épreuve d'effort progressif, la  $VO_2$  max est obtenue lorsque le participant atteint l'épuisement ou lorsque l'augmentation de l'intensité d'exercice ne s'accompagne plus d'une augmentation de la consommation d' $O_2$  (Howley et coll., 1995). Souvent décrite comme linéaire, cette relation n'est en réalité linéaire que jusqu'à environ 80 % de la  $VO_2$  max lors d'un exercice sur ergocycle (Mortensen et coll., 2005). Dans ce dernier cas, on observe alors un plateau. Cependant il n'y a pas de consensus général à cet égard. Lorsque le plateau n'est pas apparent ou lorsque la performance au cours du test semble limitée par des facteurs locaux (périphériques) plutôt que par des facteurs circulatoires (centraux), on utilise habituellement l'expression  $VO_2$  de crête ( $VO_2$  peak) qui est la plus haute valeur atteinte de consommation d'oxygène au cours du test (Zhelyazkov, 2001). Le plafonnement de la  $VO_2$  indique alors que le participant a atteint ses capacités maximales d'utilisation de l' $O_2$  et représente un des plus évidents critères d'atteinte de la  $VO_{2max}$ . D'autres indices, tels qu'un quotient respiratoire (rapport rejet de  $CO_2$ /consommation d' $O_2$  ou  $VCO_2/VO_2$ ) supérieur à 1,1, une fréquence cardiaque supérieure à 90 % de la fréquence cardiaque maximale théorique ( $220 - \text{âge du participant}$ ) et une lactatémie autour de 8 à 10 mmol/L sont également considérés comme des indices objectifs pour déterminer si la  $VO_2$  max a été atteinte (Bassett & Howley, 2000).

Ces critères permettent souvent de déterminer l'atteinte de la  $VO_{2max}$  même en l'absence d'un plateau, phénomène souvent observé chez les athlètes en endurance (Doherty et coll., 2003).

Bien qu'il y ait encore aujourd'hui une certaine controverse autour de ce sujet, plusieurs chercheurs considèrent que le point d'inflexion de la courbe du lactate est le moment où le métabolisme anaérobie devient prédominant afin de satisfaire la demande d'énergie.



Chez le participant sain, un premier seuil métabolique apparaît pour des intensités d'exercice localisées aux alentours de 50-60 % du  $\dot{V}O_{2\max}$ . Ce premier seuil métabolique a également été défini à partir des échanges gazeux mesurés à la bouche. Alors que la  $\dot{V}O_2$ , la ventilation (VE) et la  $\dot{V}CO_2$  augmentent linéairement pour les faibles intensités d'exercice, le franchissement du premier seuil métabolique marque une accélération du rejet de  $CO_2$ . La  $\dot{V}CO_2$  augmente alors plus rapidement que la  $\dot{V}O_2$ , parce que la génération de  $CO_2$  liée au tamponnage des ions  $H^+$  par les ions  $HCO_3^-$  vient s'ajouter à la production métabolique de  $CO_2$ . Ces adaptations ventilatoires conduisent le rapport VE/ $\dot{V}CO_2$  à rester constant, alors que le rapport VE/ $\dot{V}O_2$  augmente (Wassennan et coll., 1997). On parle alors de seuil ventilatoire ou de premier seuil ventilatoire (SV1) (Meyer et coll., 2005). Bien que largement sous maximal, ce premier seuil ventilatoire, exprimé en valeur absolue du  $\dot{V}O_2$  ou en % du  $\dot{V}O_2$ , est un bon indicateur de la capacité de performance dans les disciplines sportives d'endurance, plus élevée chez le sportif (70-75%  $\dot{V}O_2$ ) que chez le sédentaire (55%  $\dot{V}O_2$ ) (Meyer et coll., 2005).

Un deuxième seuil métabolique apparaît pour des intensités d'exercice plus proches de la  $\dot{V}O_2$  max. Au niveau des échanges gazeux mesurés à la bouche, on n'observe que la VE augmente en excès et non plus de manière proportionnelle à la  $\dot{V}CO_2$ . Bien que l'hyperventilation observée soit le résultat de nombreux stimuli différents, la baisse du pH sanguin couplée à la poursuite de l'augmentation linéaire de la  $\dot{V}CO_2$ , est considérée comme un de ces mécanismes essentiels (Meyer et coll., 2004). À ce niveau de puissance métabolique, le rapport VE/ $\dot{V}CO_2$  augmente de manière remarquable. Associé à l'hyperventilation et à la poursuite de l'augmentation du rapport VE/ $\dot{V}O_2$ , cet indice contribue à définir le seuil de compensation respiratoire ou encore second seuil ventilatoire (SV2).

Là aussi, lorsqu'il est exprimé en valeur absolue de la  $\dot{V}O_2$  ou en % de la  $\dot{V}O_{2\max}$ , ce second seuil métabolique est considéré comme un bon témoin de la capacité de performance aérobie (Iwaoka et coll., 1988; Laursen et coll., 2003), se rapprochant de la  $\dot{V}O_{2\max}$  (90%  $\dot{V}O_2$  max chez les athlètes de très haut niveau (Meyer et coll., 2005). Ces deux seuils métaboliques donnent des indications sur la puissance métabolique que les athlètes peuvent soutenir avant de présenter les symptômes témoignant de la mise en jeu du métabolisme anaérobie. Concrètement, plus cette zone de transition est proche de la  $\dot{V}O_2$  max, plus les athlètes seront à même de soutenir de manière prolongée une

puissance métabolique proche de leur  $VO_{2max}$ . De plus, ces deux seuils donnent des indications pour la prédiction de la performance, ainsi que pour la prescription de l'exercice (ACSM, 2001). Quant à des différences de la  $VO_{2max}$  entre les femmes et les hommes, la  $VO_{2max}$  des femmes est de 15 à 30 % plus bas que celle des hommes et ceci est attribué généralement à des différences de la composition corporelle et du contenu d'hémoglobine. Chez les femmes le pourcentage de masse adipeuse est approximativement 65 % plus élevé que chez les hommes et le contenu d'hémoglobine est de 10 à 14 % plus bas que chez les hommes, probablement à cause d'un plus bas taux de testostérone. C'est pourquoi on exprime la consommation d' $O_2$  en termes relatifs à la surface corporelle, à la masse corporelle, à la masse maigre ou au volume segmentaire.

D'autre part, dans le cas où on ne mesure pas la  $VO_2$  sous-maximal directement, mais qu'on la calcule en utilisant la charge de travail en Watts ou en Kilopound (Kp), la valeur de la  $VO_{2max}$  calculée peut être inexacte en rapport à la magnitude de la variabilité de l'efficacité mécanique étant donné le coût additionnel d'oxygène d'un effort inefficace (ACSM, 2007; Zhelyazkov, 2001)

### 3. CINÉTIQUE DE LA CONSOMMATION D'OXYGÈNE APRÈS L'EFFORT AÉROBIE

La consommation d'oxygène après exercice ne correspond pas exactement à la quantité d'énergie dépensée pendant l'exercice pour le compte des processus anaérobies. (Margaria et coll., 1933) La période de récupération a quatre fonctions principales :

- Normalisation des fonctions : la transition du fonctionnement en exercice à celui du repos.
- Réapprovisionnement des ressources énergétiques avec la surcompensation temporaire.
- Normalisation de l'équilibre homéostatique.
- Reconstruction, en particulier les structures cellulaires et le système enzymatique.

Cette récupération est d'abord très rapide au début, puis elle ralentit au fur et à mesure. Les changements rapides des premières 1-2 min. sont dus à cette diminution des actions de la commande centrale et des influences proprioceptives, puis la deuxième phase, plus lente, peut s'expliquer par la réduction de l'influence des métaborécepteurs et de l'influence hormonale.



Lors d'une étude comparative des paramètres cardio-respiratoires de la récupération après un effort aérobie et un effort anaérobie, Loïc Protin et Walid Salem 2009, qui avait parmi ses objectifs l'analyse de l'évolution des paramètres cardio-respiratoires après un effort dit « aérobie » et un effort dit « anaérobie », afin de savoir s'il y a une différence de récupération de ces paramètres pour des métabolismes différents.

Les figures 2.3 et 2.4 illustrent la cinétique de la  $VO_2$  lors de la récupération suite à un effort aérobie sur ergocycle. Nous constatons une diminution brutale de tous les paramètres et principalement la  $VO_2$  pendant les premières 30 secondes suivant l'arrêt de l'effort.

Cette baisse rapide de la  $VO_2$  pendant la phase de récupération suivant un effort aérobie, nous a obligé à adapter notre protocole expérimental. La réussite de la méthode de rétro extrapolation de la courbe de  $VO_2$  de récupération en dépend. Nous illustrons le processus plus loin dans le cadre théorique et expérimental.

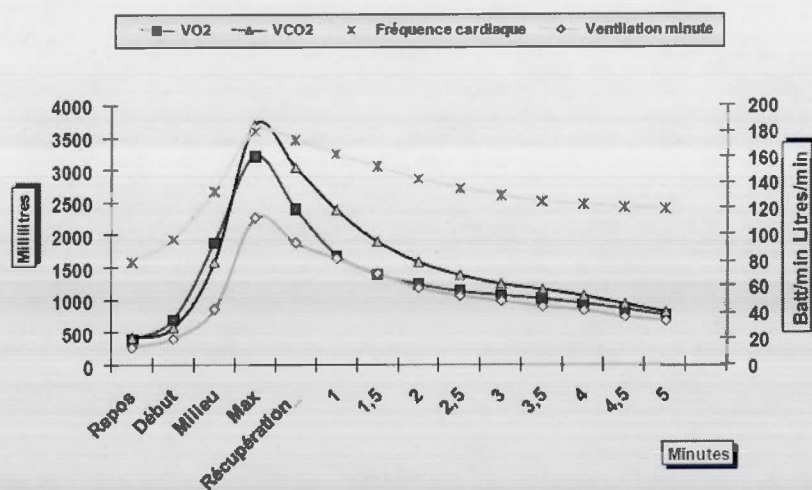


Figure 2.3 : Évolution des paramètres cardio-respiratoires de la population au test aérobie avec la récupération en fonction du temps (Loïc Protin et Walid Salem 2009)

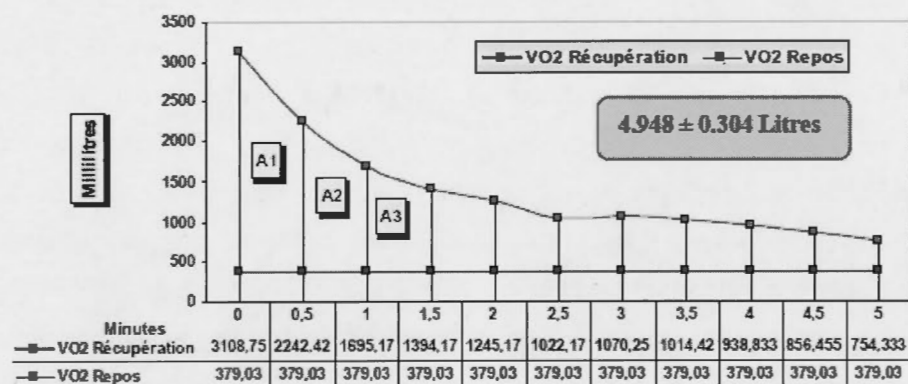


Figure 2.4 : La VO2 lors de la récupération après un test progressif continu de VO2max sur ergocycle (Loïc Protin et Walid Salem 2009)

#### 4. CLASSIFICATION DES TESTS DE PAM EN NATATION

Les nombreuses recherches réalisées au cours des trois dernières décennies ont permis de mettre en évidence les paramètres physiologiques et biomécaniques pouvant affecter les processus aérobie en natation. Contrairement aux mesures exécutées sur terrain sec, les données recueillies en milieu aquatique sont beaucoup plus fluctuantes à cause des facteurs environnementaux. Parmi ces facteurs, mentionnons :

- la température de l'eau (Costill, 1968),
- la résistance de l'eau à l'avancement (Consilman, 1955), et
- la position horizontale du corps (Holmer, 1974; Pendergast et coll., 1977)

##### 4.1. Mesure directe maximale

Plusieurs épreuves visant à mesurer la PAM ou (VO2max) ont été développées en accord avec le principe de la spécificité de l'effort. La catégorie de tests la plus connue et la plus utilisée est celle des tests directs maximaux. Cette catégorie d'épreuves en natation est principalement caractérisée par trois formes de tests de nage : la nage attachée, la nage libre et la nage en bassin à courant d'eau continu.

#### 4.1.1 La nage attachée

Les épreuves de nage attachée sont parmi les techniques de mesures directes les plus anciennes en natation. Déjà au début des années 30, certains articles de recherche en font mention (Cureton, 1930; Karpovich, 1935). Son utilisation plus systématique dans l'évaluation de la PAM ne débute toutefois que vers 1955 (Huss et Curton, 1955) Figure 2.5. Le principe de base de cette méthode est de permettre au participant de nager tout en restant sur place. Afin de maintenir le nageur en position stationnaire, une ceinture entourant ses hanches est reliée à une corde fixée habituellement au tremplin. Le principal inconvénient de cette technique réside dans le fait que le participant est relié à un point fixe. Il est alors très difficile de quantifier l'effort auquel le nageur est soumis.

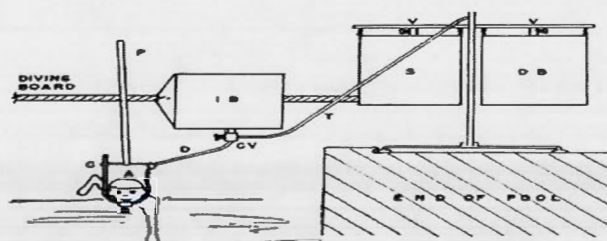


Figure 2.5 : Montage expérimental pour une épreuve d'évaluation en nage attachée d'après Van Huss et Cureton (1955)

Depuis les années 60, les systèmes de nage attachée à partir d'un point fixe ont été remplacés par des montages permettant de préciser l'intensité de l'exercice (Dixon et Faulkner, 1971; Magel et Faulkner, 1967, Magel et coll., 1974). La méthodologie utilisée implique que le nageur soit attaché à une corde reliée à un système de poulies à l'extrémité desquelles un certain nombre de poids est attaché. Le nageur doit se maintenir sur place alors que des charges de plus en plus lourdes sont ajoutées périodiquement au cours du test.

Bien que plus appropriée que les tests sur tapis roulant ou sur vélo ergométrique, la nage attachée demeure soumise à quelques contraintes. Cazorla et coll. (1982) ont critiqué ce type de test en raison du fait que le nageur éprouve de la difficulté à trouver ses « appuis » à cause de la turbulence engendrée par les mouvements des bras et des jambes du participant qui reste stationnaire. L'augmentation de la charge d'exercice a également pour effet de redresser anormalement la position du nageur.



#### 4.1.2 La nage libre

La nage libre est un type d'épreuve relativement plus récente que la nage attachée (Lavoie et coll., 1981; Cazorla et coll., Mc Ardle et coll. 1979). Cette méthode consiste à recueillir l'air expiré via un système aménagé pour suivre le nageur tout au long de son déplacement. Les composantes de l'appareillage pour la collecte des gaz sont sensiblement les mêmes que pour les épreuves de nage attachée. Toutefois, pour les tests de nage libre, le montage est érigé sur un chariot mobile qui permet au nageur d'évoluer « librement » dans ses déplacements. Ce chariot est déplacé par un technicien d'une extrémité à l'autre de la piscine en fonction de la vitesse de nage du participant (Figure 2.6). Malgré une grande utilisation, les épreuves de nage libre ne sont toutefois pas dénuées de problèmes techniques. La plus grande difficulté de ce type de test réside dans la manipulation du montage. Le chariot doit être bien conçu afin d'être facilement manipulable par les expérimentateurs et sans gêne pour les nageurs. De plus, les virages culbutés n'étant pas possibles, certains participants semblent perdre un peu d'efficacité (Lavoie et Léger, 1985).

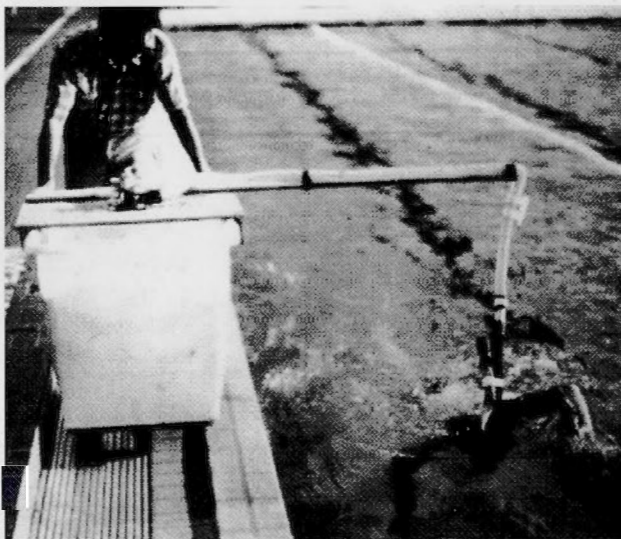


Figure 2.6 : Appareil permettant de suivre le nageur tout au long de son déplacement lors d'un test de nage libre (Lavoie et Léger, 1981)

#### 4.1.3 La nage en bassin à courant d'eau continu

La troisième et plus récente technique d'évaluation de la PMA est celle en bassin à courant d'eau continu décrit par Astrand et Englesson en 1972. Ce bassin est spécialement aménagé pour créer un mouvement d'eau progressivement accéléré contre lequel le nageur doit lutter pour se tenir sur place (Figure 2.7). L'inaccessibilité du bassin à courant d'eau continu rend difficile l'utilisation de ce protocole d'évaluation.

Ce type d'appareillage demande un équipement hautement sophistiqué et très coûteux, ce qui réduit considérablement le nombre des utilisateurs éventuels.

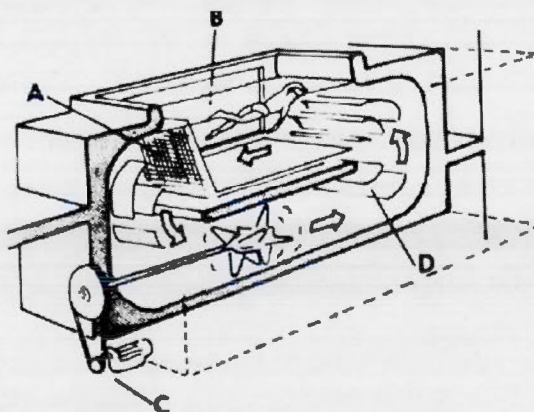


Figure 2.7 : Représentation schématique d'un bassin à courant d'eau continu (Holmer, 1974)

Le choix de l'une ou l'autre des épreuves maximales directes proposées s'avère être une question de disponibilité de matériel que de validité. Bonen et coll. en 1980, ont démontré de très fortes corrélations entre les trois tests. Il est toutefois regrettable que dans toutes les procédures directes maximales utilisées en natation, le nageur éprouve des difficultés à évoluer librement dans l'eau (Lavoie et Leger, 1985). Les accessoires tels que les valves, pince-nez, tubes, etc., avec lesquelles le nageur doit composer sont responsables de cette situation.

Bien que toutes les épreuves d'évaluation de la PAM sur terrain sec soient aussi soumises aux mêmes contraintes, il semblerait selon Lavoie et Léger (1985) ainsi que Monpetit et coll. (1981) que ce type d'appareillage soit plus contraignant en natation que dans les autres formes d'épreuves. Ces auteurs expliquent ce phénomène par les



changements au niveau de la technique de nage rendue nécessaire par la présence de l'équipement. Les éléments techniques affectés sont : la tête reste droite, le patron respiratoire modifié, l'absence du virage culbuté et l'obstruction du mouvement des bras par le système de tubes. D'ailleurs, Lavoie et Léger (1985) soulignent que les vitesses maximales atteintes dans les trois tests sont toujours inférieures à celles réalisées lorsque le nageur évolue sans appareillage.

#### 4.2 Mesure indirecte

Compte tenu des contraintes du déplacement dans l'eau, David L. Costill précise que « l'on ne peut utiliser des tests de course sur tapis roulant pour mesurer la consommation maximale d'oxygène du nageur » Pour obtenir la consommation maximale d'oxygène du participant à l'effort, il faut mesurer les volumes d'air inspiré et expiré et en analyser les contenus en oxygène et en dioxyde de carbone. Ceci se fait en munissant le nageur d'appareils comme le K4b2 qui est d'encombrement réduit, mais dont le coût est très élevé. Lors de tests que nous allons décrire plus loin. Il est à noter que ces tests permettent tous de déterminer la Vitesse maximale aérobie (VMA) du nageur, avec certaines limites, et peuvent se faire avec ou sans mesure de la PAM ou VO2 max. Dans ce dernier cas de figure, il n'est pas possible de conclure si les variations de la VMA relevées sont dues au coût énergétique ou à la VO2 max.

##### 4.2.1 Le test de Lavoie (1985)

Le départ se fait dans l'eau, le participant nage à allure progressive ; la vitesse augmente de 0,050 m/s par paliers de 2 minutes. L'allure est donnée au nageur par un observateur marchant le long du bassin à la vitesse voulue. La vitesse étant croissante, il arrive un moment où le participant n'arrive plus à suivre l'observateur. Le palier atteint à ce moment est noté. L'observateur marche à une allure donnée par un enregistrement audio. On estime que la vitesse atteinte au dernier palier franchi correspond à la VMA du nageur.

##### 4.2.2 Le Test navette à paliers multiples en natation

Les nageurs doivent nager en continu dans les deux sens entre deux cordes (quatre largeurs de couloirs) 10m d'intervalle. Un disque compact (10m (Multistage Shuttle

Swim Test) ; western australian institute of sport and university of western australia) (MSST) émet une série de signaux sonores qui donnent le rythme. La vitesse de départ est de 0,90 m/s et augmente de 0,05 m/s à chaque palier (environ 1 minute). À la fin de chaque navette, les nageurs touchent sans s'appuyer sur le câble anti-vague. Si les nageurs arrivent avant le signal, ils restent en position stationnaire en attendant le signal pour le début de la prochaine navette. Le nageur qui arrive en retard d'un coup de bras du signal sonore dans deux navettes consécutives reçoit un avertissement. Le dernier niveau et la navette achevée avant d'être éliminée est converti en distance en mètres et enregistrée en tant que résultat de la performance.

#### 4.2.3 Test navette intermittent de Water Polo.

Le test consiste à répéter 2 \* 7,5 m (trois largeurs de couloir) nagés à des vitesses progressivement croissantes entrecoupées de récupération active de 10 secondes entre chaque navette, en suivant les signaux audio émis à partir d'un disque compact (test navette intermittente water-polo, Australian Sports Commission). 1- Les participants doivent nager pour atteindre le câble anti-vague en même temps que le bip sonore. 2- Touché et retourner aussi rapidement que possible au câble anti-vague de départ en même temps que le prochain bip. À la fin de chaque navette, les joueurs touchent et libèrent immédiatement le câble anti-vague, ils attendent la prochaine navette en nageant sur place. Le début d'une nouvelle navette où le niveau est indiqué par un bip double ou triple. La vitesse de démarrage et la progression de la vitesse est beaucoup plus rapide que la MSST. Le test commence avec quatre navettes (niveaux 1 à 3) à 1,03 à 1,36 m / s, suivi de sept navettes (niveaux 4 et 5) de 1,43 à 1,46 m / s. Par la suite, la vitesse augmente de 0,05 m/s toutes les huit navettes (par niveau). Le test est interrompu lorsque le joueur est en retard sur le signal sonore d'un coup de bras pour atteindre le câble deux fois de suite. Le dernier niveau que le joueur a atteint se convertit à distance en mètres et est enregistré en tant que résultat de la performance.

#### 4.2.4 Le test de 5 minutes

Il est demandé au participant de nager pendant 5 minutes, départ dans l'eau, la plus grande distance possible. On estime que la vitesse moyenne enregistrée sur ce test correspond à la VMA du nageur. Ce test repose sur la valeur moyenne d'un temps de soutien de la VMA, hors il s'avère que ce temps varie d'un individu à l'autre.

#### 4.2.5 Le test des 5 x 200 progressifs

On demande au participant de nager une série de 5 x 200 m chronométrés à allure progressive d'un 200m à l'autre. La consigne est de « bien nager » le premier, ce qui dans le jargon de natation signifie au nageur expérimenté de nager en aérobie puis de nager le deuxième un peu plus vite et ainsi de suite jusqu'au dernier qu'il doit nager à allure maximale et régulière. La récupération entre chaque 200m est de 1 minute passive. On peut éventuellement, pour affiner le test, et si on dispose du matériel adéquat, procéder à une mesure de la fréquence cardiaque et à une mesure de "lactatémie", par prise de sang au lobe de l'oreille puis analyse, pendant cette minute de repos. La durée de récupération fait que le nageur ne repart pas pour la répétition suivante à fréquence cardiaque et "lactatémie" de repos ; celles-ci vont donc augmenter progressivement tout au long du test. Pour cette raison, et de par la longueur du test, le nageur ne pourra nager le dernier 200m au maximum de ses possibilités intrinsèques, mais seulement à sa VMA. C'est le temps réalisé sur cette dernière répétition qui donnera la VMA du nageur.

Ce test nécessite au nageur de bien se connaître et d'être capable de réguler son allure ; il s'adresse donc à des nageurs ayant une grande expérience de leur allure et non à des débutants.

#### 4.2.6 Le test du 400m

Il est demandé au participant de nager un 400m chrono départ plongé. On ignore les temps du premier et du huitième 50m, et on calcule la vitesse moyenne des six 50m intermédiaires. Ce test s'avère peu pertinent pour des nageurs débutants (nageant le 400 m à plus de six minutes) et confirmés (nageant le 400 m à moins de cinq minutes au 400m) ; en effet, pour les premiers, le temps de nage sera trop élevé et cette épreuve sera nagée à une vitesse certainement inférieure à la VMA, et pour les seconds, le temps de nage sera trop court et donc l'épreuve sera nagée à une vitesse supérieure.

Une fois la VMA déterminée, il est possible de l'exploiter afin d'élaborer les séries d'entraînement propres à la développer. L'amélioration de la VMA sera envisagée ici uniquement d'un point de vue énergétique (donc lié au développement de la VO2 max).

#### 4.2.7 Le test de 12 min nage libre

En 1979, Jackson et coll. proposa un test indirect de nage de 12 minutes, inspiré du test de course de Cooper (1968). Cette épreuve non progressive consiste à mesurer l'endurance en natation en enregistrant la distance totale nagée en 12 minutes. Ce test, lorsque corrélé avec un test maximal de nage attachée s'est avéré valide ( $r = 0,898$ ).

Le principal avantage de ce test est qu'il permet de comparer les nageurs entre eux ou à différents moments dans un programme d'entraînement. D'un autre côté, son aspect non progressif le rend moins sécuritaire, plus difficile psychologiquement et ne permet pas de bien doser l'effort. De plus, la valeur mesurée (la distance) ne donne aucune information pertinente pour la détermination des vitesses d'entraînement.

Finalement, ce type d'épreuve est fortement influencé par les écarts d'efficacité de nage.

Ce dernier point est d'ailleurs un facteur déterminant pour l'évaluation de la PAM en natation. Montpetit et coll. (1983) rapportent d'importantes variations dans l'efficience de nage entre nageurs de même niveau. Nous nous attarderons sur ce point pour mieux comprendre l'influence de l'efficacité technique et par conséquent le coût énergétique (CR) sur la PAM et la VMA qui représente en fin de compte l'information la plus pertinente que les professionnels de l'entraînement cherchent.

### 5. L'INFLUENCE DE L'EFFICACITÉ BIOMÉCANIQUE ET LES PARAMÈTRES DE PROPULSIONS SUR LA PAM

La natation, comme toute activité physique, a un coût énergétique. La  $VO_2$  max est donc liée au coût énergétique (CR) (en mL d' $O_2$  par m par kg). La relation entre la VMA, la  $VO_2$ max et le CR est la suivante :  $VMA = VO_2max / CR$ . Pour augmenter la VMA, que l'on peut considérer comme l'expression de la  $VO_2$  max sur le terrain, il faut donc soit augmenter la  $VO_2$  max, soit diminuer le coût énergétique. Ce dernier point se fait par un travail technique lié notamment à l'équilibration du nageur. Le coût énergétique ou en d'autres termes l'efficacité énergétique est donc le premier facteur limitant de la VMA. Pendergast et coll. (1977) et Di Prampero et coll. (1974) ont été particulièrement actifs dans l'établissement de protocoles d'évaluation de l'habileté technique en natation.



D'après leurs travaux, la mesure de la  $VO_2$  rapportée pour une distance nagée de 1 km ( $VO_2 / D$ ) est un excellent indice de l'habileté technique de nage.

En 1979, Craig et Pendergast suggérèrent d'évaluer l'habileté de nage de façon indirecte, en considérant le nombre de mouvements de bras et la distance parcourue par mouvement. Cette procédure permet d'éliminer les mesures directes tout en ayant une bonne estimation de l'efficacité de nage du participant. Ainsi, l'introduction d'une mesure indirecte de l'efficacité globale de nage a pour effet principal de faciliter la tâche des intervenants qui peuvent alors estimer d'une manière simple et objective l'habileté technique de nage de leurs athlètes et d'observer l'amélioration de cette habileté apportée par l'entraînement. À partir de ces considérations, un groupe de chercheurs de l'Université de Montréal s'appliquèrent à mettre au point une épreuve permettant de mesurer indirectement la PAM et la puissance aérobie maximale fonctionnelle (PAMF) tout en tenant compte de l'efficacité globale du nageur (Léoné. 1985 et Lavoie et coll., 1985). Le principal intérêt de cette procédure est qu'elle permet de prédire la PAM en considérant les écarts d'efficacité de nage de façon indirecte dans les deux cas. Nous reviendrons plus tard sur ce test en détail, car il représente le point de départ de notre démarche expérimentale. D'autres études plus récentes (J. Jurimae et coll. 2007) qui ont abordé l'analyse des performances des nageurs en stage de pré puberté ( $n=15$ ) (11,9 +/- 0,3ans) et en stage de puberté ( $n=14$ ) (14,3 +/- 1,4 ans) à partir des paramètres anthropométriques, physiologiques, et biomécaniques, confirme que l'indice de mouvement des bras (Stroke Indice), l'envergure des bras (Stroke length), ainsi que la  $VO_{2max}$  sont les majeurs déterminants de la performance en natation, spécifiquement sur 400m crawl. Une analyse de corrélation de la même étude (Jurimae et coll. 2007) a démontré que les paramètres de propulsion à savoir ; la vitesse ( $v$ ), l'envergure des bras (SL), l'indice de mouvement des bras (SI), le coût énergétique ( $C_s$ ) et la consommation d'oxygène maximale ( $VO_2$  peak), sont en relation significative avec la taille (Height), la masse corporelle, l'indice de masse corporelle (BMI), la masse maigre (FFM), la densité minérale osseuse (BMD) et l'envergure des bras (Arm span) chez les jeunes nageurs. (Tableau 2.2).



Tableau 2.2 : Les coefficients de corrélation entre les paramètres de propulsion,  $C_s$ ,  $VO_2$  et  $\Delta La$  et les caractéristiques de la composition corporelle chez les jeunes nageurs

**Correlation Coefficients of Stroke Parameters,  $C_s$ ,  $VO_2$  and  $\Delta La$  With Body-Composition Characteristics in Young Swimmers**

	Time (s)	$v$ (m/s)	SL (m/cycle)	SR (cycle/min)	SI ( $m^2 \cdot s^{-1} \cdot \text{cycles}^{-1}$ )	$C_s$ (kJ/m)	$VO_2$ (L/min)	$\Delta La$ (mmol/L)
Height (cm)	-0.658*	0.675*	0.707*	-0.107	0.721*	0.718*	0.856*	0.291
Body mass (kg)	-0.620*	0.655*	0.693*	-0.100	0.714*	0.693*	0.839*	0.285
BMI ( $kg/m^2$ )	-0.479*	0.520*	0.562*	-0.087	0.582*	0.540*	0.669*	0.173
Body fat%	0.136	-0.113	-0.065	-0.121	-0.100	-0.260	-0.242	-0.378*
FM (kg)	-0.161	0.197	0.245	-0.132	0.228	0.013	0.106	-0.215
FFM (kg)	-0.593*	0.609*	0.689*	-0.155	0.690*	0.656*	0.780*	0.377*
BM (kg)	-0.563*	0.588*	0.682*	-0.185	0.675*	0.680*	0.789*	0.404*
Total BMD ( $g/cm^2$ )	-0.454*	0.481*	0.583*	-0.188	0.569*	0.726*	0.778*	0.415*
Spine BMD ( $g/cm^3$ )	-0.516*	0.550*	0.562*	-0.033	0.592*	0.657*	0.749*	0.415*
Arm span (cm)	-0.688*	0.707*	0.746*	-0.105	0.758*	0.675*	0.839*	0.282
Tanner stage	-0.430*	0.437*	0.538*	-0.207	0.512*	0.759*	0.781*	0.459*

Note.  $v$  = speed; SL = stroke length; SR = stroke rate; SI = stroke index;  $C_s$  = energy cost of swimming;  $VO_2$  = oxygen consumption;  $\Delta La$  = net increase of blood lactate; BMI = body-mass index; FM = whole-body fat; FFM = fat-free mass; BM = bone-mineral mass; BMD = bone-mineral density.

\* $p < .05$ .

En s'inspirant des travaux de Craig et Pendergast (1979), Lavoie et coll. (1985) ont proposé un indice de mouvement de bras pour estimer l'efficacité de nage. Cet indice consiste à mesurer le nombre de mouvements de bras pour 125 mètres style libre, divisé par la vitesse de nage librement déterminée par le nageur.

Les avantages reliés à cette mesure sont nombreux. En premier lieu : il y a la simplicité de l'épreuve. Le seul équipement requis est un chronomètre. Ce test présente également l'avantage de pouvoir être administré à plusieurs nageurs à la fois. De plus, cette épreuve pouvant être administrée périodiquement, il devient alors très facile d'estimer les progrès réalisés durant la période d'entraînement. Utilisé dans ces conditions, ce test peut devenir un outil important pour évaluer les progrès techniques. Il faut cependant garder en tête que l'indice de mouvement de bras (IMB) est un indice global de l'habileté technique de nage. Cet indice ne mesure pas proprement parlé le rendement mécanique. L'IMB tient compte d'un ensemble de facteurs morphologique, force, puissance, densité..., sans discrimination particulière.

## 6. LA RETROEXTRAPOLATION DE LA COURBE DE RÉCUPÉRATION DE L'OXYGÈNE

### 6.1. Rétro extrapolation avec Logarithme

Afin de pallier les problèmes méthodologiques inhérents aux méthodes directes d'évaluation de la PAM en natation, Montpetit et coll. en 1981 utilisa la technique de retro extrapolation de la courbe de récupération de l'O<sub>2</sub> pour mesurer la PAM des nageurs compétitifs. Cette technique qui a été validée par Léger et coll. (1980) pour des épreuves de course à pied, consiste à mesurer la consommation d'oxygène pendant les 80 premières secondes de la récupération immédiatement après l'arrêt de l'exercice.

Il suffit alors de rétro extrapoler les valeurs mesurées jusqu'au temps zéro qui correspond à la VO<sub>2</sub> de la fin de l'exercice. Le processus de validation est passé à travers trois protocoles expérimentaux de mesure de la PAM (VO<sub>2</sub>max) en utilisant la technique du circuit ouvert. L'air expiré était collecté à travers une valve Otis-McKerrow dans des ballons météorologiques. Les volumes étaient mesurés avec un spiromètre Tissot, l'oxygène (O<sub>2</sub>) et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) étaient analysés respectivement avec analyseur paramagnétique

Bekman E2 et un analyseur infrarouge Beckman LB-1 calibré par des gaz à concentration connue (micro Schollander technique). Dans le premier protocole, 22 participants (25,1 +/- 7,2 ans, 68,1 +/- 12,5 kg) ont subi un test continu et progressif à paliers multiples de 2 min avec une augmentation de 1 MET (3,5 ml O<sub>2</sub> kg/min) sur vélo stationnaire ou tapis roulant. La VO<sub>2</sub> était mesurée sur les dernières 30 secondes de l'effort de chacun des paliers et pendant les premières 80 secs de récupération directement après l'effort. Une valve à trois voix était utilisée pour collecter l'air expiré dans le bon ballon au moment voulu.

Il a été constaté avec les huit premiers tests que pas plus de trois ou quatre premiers échantillons peuvent être utilisés pour calculer l'exponentielle de régression afin d'éviter la composante lente de la courbe de récupération. Les valeurs suspectes et/ou les valeurs de la composante lente ont été écartées avant de calculer l'exponentielle de régression, en traçant les points sur un papier semi-logarithmique donnant une courbe de récupération linéaire (voir la figure 2.8)

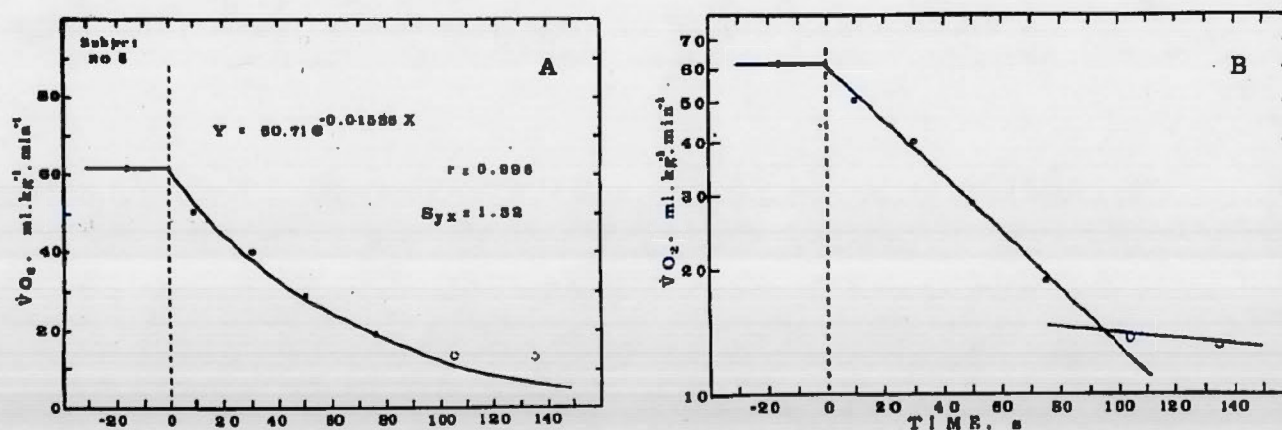


Figure 2.8 : Courbe typique de VO<sub>2</sub> de récupération pour un sujet montrant les composantes rapide et lente de la courbe. Le panneau A montre tout le tracé linéaire. Le panneau B montre le tracé semi-logarithmique.  $S_{yx}$  et  $r$  sont l'erreur-type de l'estimation et le coefficient de corrélation entre X et Y. Collection de l'air expiré a commencé au temps zéro de la récupération.



Dans le deuxième protocole, 16 participants (20,8 +/- 1,6 ans, 72,2 +/- 7 kg) ont subi un test de course à paliers multiples sur tapis roulant. Le test débute à une vitesse de 11,3 km/h (7 mph) et une pente de 0%. La pente augmentait de 2,5% à chaque 2 minutes jusqu'à l'atteinte d'une pente de 12.5 %. La vitesse augmentait de 1,61 km/h à chaque 2 minute aussi. Les participants libéraient le système de collecte de gaz lorsque le dernier palier atteint, et continuaient de courir pendant quelques secondes. Aussitôt le tapis roulant arrêté, les participants respiraient dans un autre système de collecte de gaz pour simuler les conditions de terrain. Le délai entre l'arrêt de l'effort et le début de l'échantillonnage de l'air expiré était en moyenne environ trois secondes.

Dans le troisième protocole, les participants ont subi un test de course progressive sur une piste intérieure de 167 m avec des courbes inclinées. Des repères ont été placés à chaque quart de section de la piste. Les participants devaient suivre le rythme de signaux sonores émis à des fréquences spécifiques à l'aide d'une bande préenregistrée. La vitesse de course a été augmentée de 1MET toutes les deux minutes. Les 11 participants (21,7 +/- 3,4 ans et 61,3 +/- 8,1 kg) complétaient autant d'étapes que possible, et à la fin de leurs courses, ils devaient respirer immédiatement dans le circuit ouvert d'échantillonnage pour la collecte des gaz expirés. Les valeurs extrapolées ont été comparées à celles obtenues au cours de la dernière étape du protocole identique effectué sur le tapis roulant.

Lors du premier protocole, lorsque l'air expiré a été échantillonné directement au début de la récupération, la VO<sub>2</sub>max rétro-extrapolée à partir de la courbe de récupération de VO<sub>2</sub> et la VO<sub>2</sub>max mesurée pendant l'exercice étaient respectivement de 56,5 +/- 7,4 et 56,1 +/- 7,6 ml/kg/min, et le coefficient de corrélation de Pearson a été de 0,90 comme relevé au tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Comparaison entre les valeurs de VO<sub>2</sub>max obtenues via la retro extrapolation de la courbe de VO<sub>2</sub> pendant la récupération (BE VO<sub>2</sub>max=x) et la VO<sub>2</sub>max mesurée pendant l'effort (Exercice VO<sub>2</sub>max=y) avec les différents protocoles expérimentaux.

CONDITIONS <sup>a</sup>	n	$\bar{X} \pm SD$	$\bar{Y} \pm SD$	$\bar{\Delta} \pm SD$	BE VO <sub>2</sub> max vs Exercice VO <sub>2</sub> max <sup>b</sup>		Syx	r	t	P
					m	b-				
I	20	56.5 ± 7.4	56.1 ± 7.6	0.41 ± 3.35	1.138	-8.198	3.30	0.90	0.54	0.6
II	16	63.9 ± 6.7	63.1 ± 7.0	0.85 ± 3.23	0.923	+4.061	3.30	0.89	1.05	0.30
I & II	36	59.8 ± 8.0	59.2 ± 8.1	0.60 ± 3.25	1.102	-6.698	3.21	0.92	1.11	0.28
III	11	62.6 ± 13.0	61.2 ± 13.3	1.40 ± 2.84	0.996	-1.145	2.99	0.98	1.64	0.13

<sup>a</sup>I and II: Laboratory experiments without and with a 3-s delay between the start of recovery and the start of air collection period. III: Field experiments.

<sup>b</sup>X and Y: BE and EXERCISE VO<sub>2</sub>max in ml kg<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>; Δ: difference between BE and EXERCISE VO<sub>2</sub>max; m and b: y=mx+b; Syx: standard error of the estimate; r: Pearson's correlation coefficient; t: paired t test; and P: level of significance.



Dans le deuxième protocole, où un délai de trois secondes est introduit avant de se connecter à la valve respiratoire. L'extrapolation à temps zéro de récupération sous-estime sensiblement la  $\dot{V}O_2$  max ( $p < 0,006$ ), donnant une valeur de  $60,7 \pm 6,0$  comparativement à  $63,7$  mlO<sub>2</sub>/kg/min de la  $\dot{V}O_2$ max mesurée pendant l'exercice. Toutefois, lorsque la rétro extrapolation de la  $\dot{V}O_2$  max a été corrigée pour compenser le délai des trois secondes, l'estimation a été améliorée pour une valeur de  $63,9 \pm 6,7$  ml /kg/min (figure 2.9)

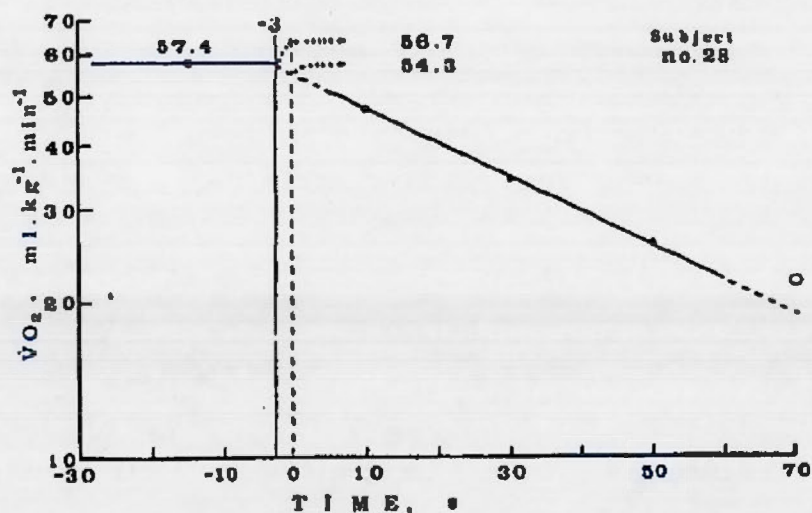


Figure 2.9 : Courbe typique de récupération O<sub>2</sub> pour un sujet. Collecte de l'air expiré a commencé à 3 secondes après le début de récupération pour permettre au sujet de se connecter à la valve respiratoire après l'exercice

Lorsque les résultats du premier et deuxième protocole étaient combinés ( $n = 36$ ), les valeurs  $\dot{V}O_2$ max de l'exercice et de la rétro extrapolation étaient de  $59,2 \pm 8,1$  et  $59,8 \pm 8,0$  ml/kg/min avec  $r = 0,92$  et une différence ( $\Delta$ ) de  $0,6 \pm 3,25$  ml O<sub>2</sub>/kg/min (figure 2.10)

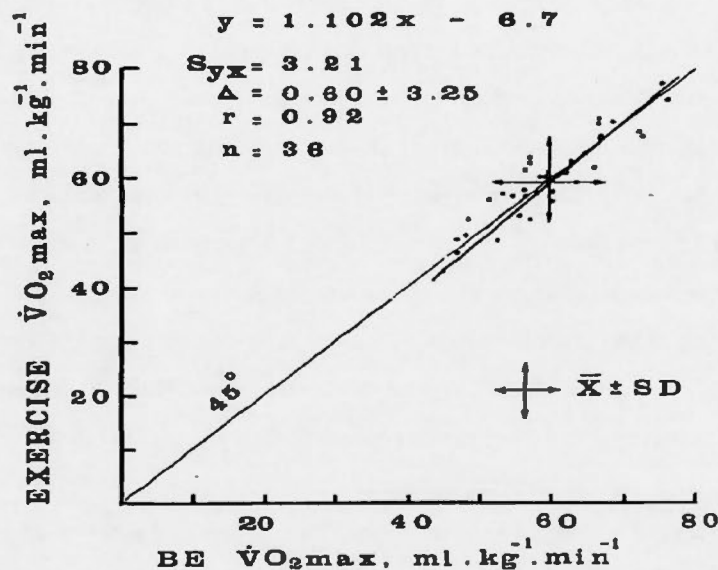


Figure 2.10 : Corrélation entre la mesure directe de  $\dot{V}O_{2\max}$  pendant l'effort (exercice) et la  $\dot{V}O_{2\max}$  obtenue avec la retro extrapolation de la courbe de récupération  $O_2$  (BE). Les données de la 1ère et 2ème série d'expériences ont été combinées ( $n = 36$ )

Dans le troisième protocole, les valeurs obtenues par la rétro extrapolation suite à la course sur piste et la mesure directe de la  $\dot{V}O_{2\max}$  pendant l'exercice sur tapis roulant étaient similaires ( $62,2 \pm 13,0$  et  $61,2 \pm 13,3$ ) avec  $r = 0,98$ ,  $\Delta = 1,40 \pm 2,84$  et  $S_{y\bar{x}} = 2,99$ . La méthode de rétro extrapolation a donné des valeurs similaires à la collecte directe de  $\dot{V}O_2$  pendant l'exercice, si les échantillons ont été prélevés immédiatement au début de la récupération sans dépasser le délai de 3 secondes. Ainsi, les résultats de toutes les expériences ont été combinés ( $n = 36$ ), ce qui a donné des résultats presque identiques pour les valeurs extrapolées et les mesures conventionnelles directes du  $\dot{V}O_2$ .

Selon Leger et col 1980, le coefficient de corrélation de 0,92 est assez élevé pour un groupe homogène de participants entraînés. L'estimation de la marge d'erreur n'était que de 3,21 ml $\dot{V}O_2$ /kg/min (5,1%) et pourrait probablement être réduite en outre au début et à la fin de la période de collecte de l'inspiration et en chronométrant cette période précise au lieu d'utiliser une période de 20 secondes comme cela a été fait dans leur étude (Leger et col., 1980).

Enfin, la pente et l'ordonnée à l'origine de la régression linéaire ne sont pas significativement différentes de 1 et 0 respectivement, ce qui rend inutile d'utiliser l'équation de régression pour corriger la VO<sub>2</sub>max obtenue avec la rétro extrapolation. La méthode s'est avérée également satisfaisante dans des conditions de terrain (piste de course). Ainsi Leger et col, (1980) ont conclu que l'extrapolation rétrospective de la courbe de récupération de la VO<sub>2</sub> est une méthode valable, et valide pour mesurer la VO<sub>2</sub>max dans les conditions de terrain ou de laboratoire. Les contraintes biomécaniques dues à l'appareillage pendant l'effort sont ainsi enlevées permettant au participant l'utilisation intégrale de son potentiel technique. Ainsi l'effort ou la dépense énergétique lors du test est identique à celle fournie lors de l'entraînement ou la compétition. Suite à cette étude concluante, R. Montpetit, L. A. Léger, Jean-Marc Lavoie et Georges Cazorla ont tout de suite (1981) tenté d'utiliser la Retro extrapolation de la courbe de récupération du VO<sub>2</sub> en natation, discipline où l'aménagement matériel pour la collecte des gaz affecte beaucoup la performance. Et de la même occasion reconfirmer la validité et la fidélité de cette technique spécifiquement dans cette discipline.

## 6.2 Rétroextrapolation avec exponentielle

Gordon Sleivert, et col. (1991), tentaient de vérifier la validité et l'applicabilité des exponentielles contre l'extrapolation rétrospective linéaire de la courbe de récupération d'O<sub>2</sub> pour la prédiction de la consommation d'oxygène à la fin de l'exercice. Huit hommes et femmes ( $20,1 \pm 0,9$  ans pesant  $66,0 \pm 2,5$  kg) ont réalisé sept paliers d'effort sur ergo-cycle à des puissances sous-maximales allant de 50 à 175 W. Les gaz respiratoires ont été recueillis auprès de chaque participant au cours de l'exercice et de la récupération. L'extrapolation mono-exponentielle de cinq échantillons de récupération ( $R^2=0,85$ ) et l'extrapolation linéaire d'une reprise ( $R^2=0,83$ ) représentaient des valeurs similaires de la variance dans la prédiction de VO<sub>2</sub> de l'effort. (figure 2.11)

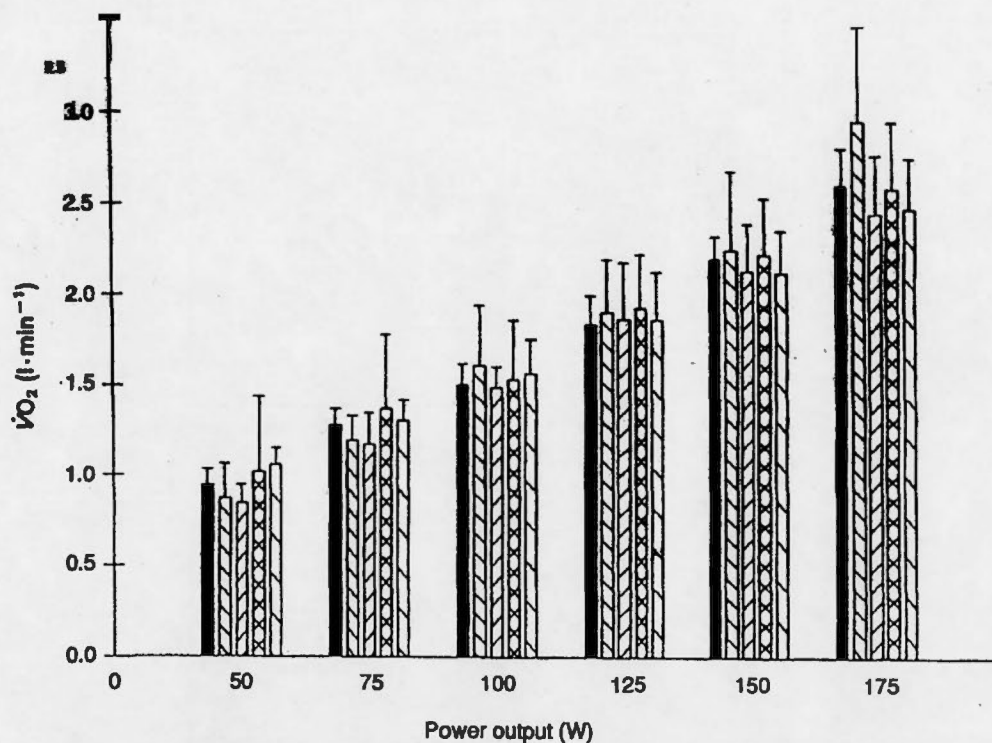


Fig. 1. Oxygen consumption ( $\dot{V}O_2$ ) as measured or estimated at different power outputs using five different techniques:  $D\dot{V}O_2$ , Direct exercise  $\dot{V}O_2$  measurement;  $E_1\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}O_2$  estimated via monoexponential regression of 4 recovery  $\dot{V}O_2$  values;  $SE_1\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}O_2$  estimated via smoothed monoexponential regression of 5 re-

covery  $\dot{V}O_2$  values;  $E_2\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}O_2$  estimated via biexponential regression of 11 recovery  $\dot{V}O_2$  values;  $LR_1\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}O_2$  estimated via linear regression of 1 recovery  $\dot{V}O_2$  values. ■  $D\dot{V}O_2$ ; ▨  $E_1\dot{V}O_2$ ; ▩  $SE_1\dot{V}O_2$ ; ▤  $E_2\dot{V}O_2$ ; ▥  $LR_1\dot{V}O_2$

Figure 2.11 : Consommation d'Oxygène ( $VO_2$ ) telle que mesurée ou estimée à différentes puissances en utilisant cinq techniques différentes.

L'équation de régression linéaire était le prédicateur le plus pratique, car seulement un échantillon des gaz de récupération était nécessaire et il n'a pas besoin d'utiliser des techniques mathématiques complexes de la régression exponentielle. (G. Sleivert et all. 1991) (figure 2.12)



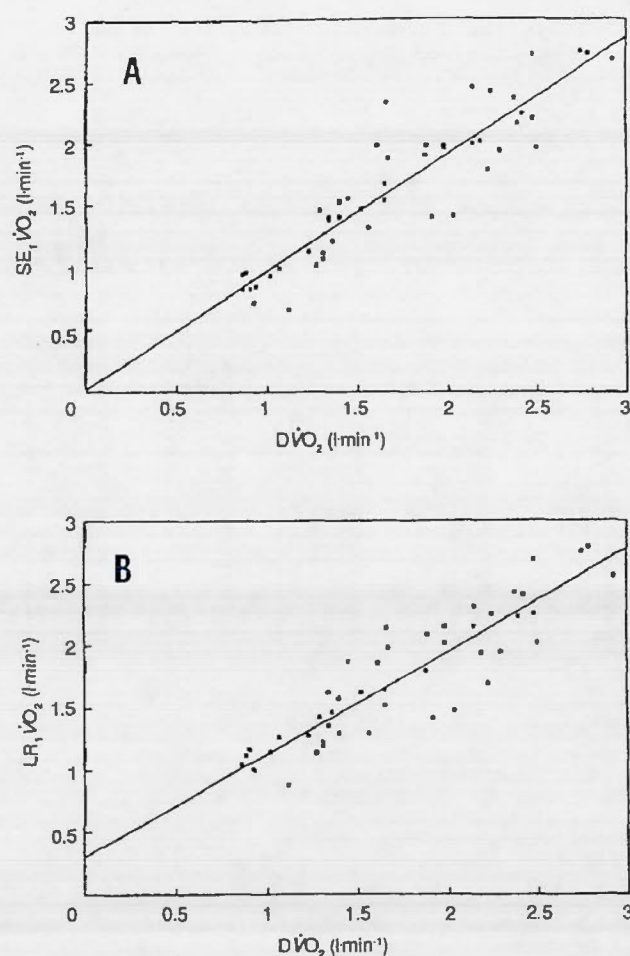


Figure 2.12 : Régression linéaire de la mesure directe de  $VO_2$  pendant l'effort ( $DVO_2$ ) avec A.  $VO_2$  estimée en utilisant la technique de régression avec mono-exponentiel lissée ( $SE VO_2$ ) et B.  $VO_2$  estimé par régression linéaire du premier prélèvement de  $VO_2$  de récupération ( $LR VO_2$ ). A:  $y = 0,262 + 0,884 x$  ;  $r = 0,92$ . B:  $y = 0,365 + 1,014 x$  ;  $r = 0,91$

## 7. TEST MAXIMAL PROGRESSIF A PALIERS MULTIPLES EN NATATION

Montpetit et coll. (1981) ont conduit une étude qui avait le but d'évaluer l'exactitude et la faisabilité de l'estimation de la consommation d'oxygène ( $VO_2$ ) pendant la nage maximale en

utilisant la rétro extrapolation de la courbe de récupération  $\dot{V}O_2$  au temps zéro qui correspond au moment de la fin de l'effort et le début de la récupération.

Deux séries de tests ont été menées. Dans les premiers tests, la validité de la méthode de retro extrapolation a été justifiée suite à une comparaison entre les valeurs de crête  $\dot{V}O_2$  obtenues directement au cours de la nage (Gaz collecté dans des sacs Douglas) et celles estimées lors de la rétro extrapolation de la courbe de récupération d' $\dot{V}O_2$ .

Tableau 2.4 : Comparaison des valeurs de  $\dot{V}O_{2max}$ ,  $\dot{V}_E$ , et R lors de course sur tapis roulant et en natation

	Series A (n = 11)			Series B (n = 28)	
	Treadmill running (Douglas bag method)	Swimming		Treadmill running (Douglas bag method)	Swimming (BE method)
		(Douglas bag method)	(BE method) <sup>a</sup>		
$\dot{V}O_2$ peak, $l \cdot min^{-1}$	$3.91 \pm 0.55$	$3.81 \pm 0.59$	$3.79 \pm 0.66$	$3.23 \pm 0.71$	$3.37 \pm 0.77$
Max. pulmonary ventilation $l \cdot min^{-1}$ BTPS	$127 \pm 21$	$111 \pm 19$	$101 \pm 17^b$	$106 \pm 18$	$96 \pm 27^b$
Respiratory exchange ratio	$1.08 \pm 0.04$	$1.02 \pm 0.04$	$1.11 \pm 0.05^b$	$1.07 \pm 0.05$	$1.10 \pm 0.14^b$
r	0.99		0.94		0.95

Values are means  $\pm$  SD

<sup>a</sup>  $\dot{V}O_2$  peak measured by the backward extrapolation method (BE)

<sup>b</sup>  $\dot{V}_E$  and R for the first collection immediately following the end of exercise

Ces résultats ont également été comparés avec la  $\dot{V}O_{2max}$  mesurée pendant la course en pente sur tapis roulant. La  $\dot{V}O_{2max}$  mesurée pendant la nage libre maximale et celles estimées par la rétro extrapolation pendant la période de récupération après l'effort, n'étaient pas significativement différentes. Aucune différence significative entre  $\dot{V}O_2$  obtenue sur le tapis roulant et en nage libre.

Dans les seconds tests, la  $\dot{V}O_2$  a été mesurée pour chacun des 28 nageurs pendant la course en pente sur tapis roulant (méthode conventionnelle) et lors de la nage libre en utilisant la rétro extrapolation de la courbe d' $\dot{V}O_2$ . La valeur moyenne était significativement plus élevée pendant la nage ( $X = 3,37$ ) que lors de la course ( $X = 3,23$ ). Soixante-quinze pour cent des participants avaient atteint des  $\dot{V}O_{2max}$  supérieures lors de la nage (Montpetit et al, 1981). La méthode de Rétro extrapolation de la courbe de récupération d' $\dot{V}O_2$  est fiable et valide pour mesurer la  $\dot{V}O_{2max}$  en natation lors d'effort maximal, et permet au nageur d'utiliser tous les groupes musculaires sollicités en nage sans aucune restriction, et exploité tout le potentiel

technique pour que la dépense énergétique pendant le test soit identique à celle de l'entraînement et la compétition.

VO<sub>2</sub> Peak During Frec Swimming

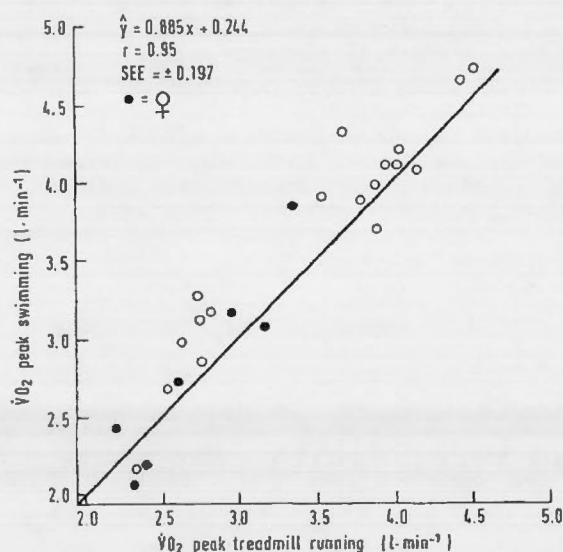


Figure 2.13 : Comparaison des valeurs de crête de la VO<sub>2</sub> pendant la course sur tapis roulant et pendant la nage maximale en utilisant la méthode de retro extrapolation (BE) de la courbe de récupération d'O<sub>2</sub>

À partir des considérations de la mesure de l'efficacité globale de nage et de l'utilisation de la méthode de rétro extrapolation pour mesurer la VO<sub>2</sub>, Lavoie et coll. (1985) ont construit un test progressif à paliers multiples permettant la prédiction de la PAM en natation. Le test est constitué de 20 paliers d'effort d'une durée de 2 minutes chacun. La vitesse initiale a été fixée de 0,80 m/s et est augmentée de 0,05 m/s à chaque palier. La tâche du nageur est de compléter le nombre maximal des paliers de 2 minutes. Deux moyens se sont avérés efficaces pour indiquer avec précision la vitesse à laquelle les nageurs doivent évoluer. Le premier consiste à indiquer la vitesse à l'aide d'un signal sonore audible par le nageur (une bande magnétique a été spécialement conçue à cet effet). Il est recommandé aussi qu'un des expérimentateurs se déplace le long de la piscine au même rythme que les signaux. Ainsi, cette personne constitue une seconde source de repérage

visuel pour les nageurs. Plusieurs avantages peuvent être reliés à l'utilisation de ce test. En premier lieu, il permet d'établir avec un niveau de précision acceptable la PAM des nageurs ( $r = 0,877$ ) particulièrement pour les vitesses comprises entre 0,80 m/s à 1,30 m/s. Cette épreuve peut également être utilisée pour mesurer la puissance aérobique maximale fonctionnelle (PAMF). La PAMF correspond à la vitesse maximale aérobique atteinte au dernier palier de test. Durant les mois intenses d'entraînement, ce test peut être utilisé afin de mesurer l'amélioration des nageurs (vitesses maximales aérobiques) comme :

$$\text{la PAMF} = \text{PAM} \times \text{Efficacité mécanique},$$

où l'amélioration de l'un ou l'autre de ces paramètres causera une amélioration de la PAMF. Si c'est la PAM qui est le point d'intérêt, elle peut être aussi établie. Il suffit de connaître la valeur du rapport entre le nombre de mouvement de bras pour 125 m et la vitesse de nage libre (IMB) ainsi que le numéro du dernier palier complété et de transposer ces deux valeurs sur le tableau 2.5. La valeur apparaissant dans cette grille constitue la VO<sub>2</sub> max du nageur (ml/kg/min). Ainsi, si deux nageurs terminent l'épreuve au palier 12 (1.20m/s) mais que l'un d'eux a un IMB de 60 et l'autre de 90, le VO<sub>2</sub> max du premier est alors évalué à 54,4 ml/kg/min tandis que le second obtient comme résultat une VO<sub>2</sub> max de 58,1 ml/kg/min.

Tableau 2.5 : Puissance aérobique maximale (ml/kg/min) prédite à partir de la vitesse maximale aérobique et de l'indice de mouvement de bras (IMB) (Test maximal progressif à paliers multiples en natation de Leger et Lavoie 1985)

Paliers	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vitesse m/s	1,0	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45
IMB										
60	35,1	39,9	44,7	49,6	54,4	59,3	64,1	69,0	73,8	78,7
65	35,7	40,5	45,4	50,2	55,1	59,9	64,7	69,6	74,4	79,3
70	36,3	41,1	46,0	50,8	55,7	60,5	65,4	70,2	75,0	79,9
75	36,9	41,7	46,6	51,4	56,3	61,1	66,0	70,8	75,6	80,5
80	37,5	42,3	47,2	52,1	56,9	61,7	66,6	71,4	76,3	81,1
85	38,1	42,9	47,8	52,7	57,5	62,3	67,2	72,0	76,9	81,7
90	38,7	43,5	48,4	53,6	58,1	62,9	67,8	72,6	77,5	81,8



Paliers	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
95	39,4	44,1	49,1	54,2	58,7	63,5	68,4	73,2	78,1	82,9
100	40,0	44,8	49,7	54,6	59,4	64,1	69,0	73,8	78,7	82,5
105	40,6	45,3	50,3	55,2	60,0	64,7	69,7	74,4	79,4	83,2
110	41,2	45,9	50,9	55,8	60,6	65,4	70,3	75,0	80,0	84,8
115	41,8	46,7	51,5	56,4	61,2	66,0	70,9	75,6	80,6	85,4
120	42,4	47,3	52,1	57,0	61,8	66,6	71,5	76,2	81,2	86,0

Finalement, puisque ce test permet d'établir la vitesse maximale de nage aérobie (vitesse du dernier palier complété), l'entraîneur peut facilement établir l'intensité de l'entraînement à prescrire. Ainsi, si un individu atteint sa PAMF au palier 12, sa vitesse maximale aérobie est égale à 1,20 m/s. Donc, à l'entraînement, si l'on veut que ce nageur fournisse un effort correspondant à 70% de son VO<sub>2</sub> max, il devra alors s'entraîner à 0,85 m/s. Concrètement, il doit avoir un temps de passage 1min25sec au 100 m pour des séries « d'endurance de base » de début de saison ou de récupération active après une séance intense.

## CHAPITRE III

### METHODOLOGIE

#### 1. PARTICIPANTS

Le groupe des participants était constitué de 15 nageurs et 9 triathlètes dont 7 filles et 17 garçons (âgés de  $22,5 \pm 8,3$  ans) réalisant le 400m nage libre en  $4,57 \pm 1,11$  minutes. La participation des participants était sur une base volontaire après les avoir informés du protocole des tests ainsi que sur les risques et les bénéfices associés à leur participation. L'étude fut approuvée par le comité de déontologie de l'UQAM.

Le recrutement des participants était fait par l'intermédiaire des conseils d'administration des clubs de natation et triathlon de la région de Montréal, qui nous ont présenté aux nageurs et triathlètes ainsi que par invitation directe et affichage. Entre chacune des 2 séances d'évaluation, un repos de 48 heures minimum était imposé aux participants. Toutefois, les deux sessions étaient réalisées à l'intérieur d'une semaine afin d'éliminer l'effet de l'entraînement.

##### 1.1 Questionnaire de consentement et directives pré-test

Chaque participant était informé du protocole et a signé un consentement (Annexe 1) éclairé de participation. Chaque participant a répondu au Q-AAP (annexe 2). Chaque participant a été informé de ne pas manger, boire de boisson avec caféine 3 heures avant le test, boire de boisson alcoolisée 6 heures avant le test et faire de l'exercice vigoureux 24 heures avant le test.

##### 1.2 Critères d'inclusions :

Garçon et fille sans historique ou évidence de maladie pulmonaire et/ou cardiovasculaire. - Réponses négatives à toutes les questions du questionnaire sur l'aptitude à l'activité physique (Q-AAP).

- Nageurs et triathlètes actifs affilié au sein d'un club compétitif participant aux compétitions du calendrier de la fédération de natation du Québec (FNQ) ou de la Triathlon Québec (TQ). - Nageurs et triathlètes participant à trois séances de natation par semaine minimum tout le long de la saison précédente et celle en cours.

### 1.3 Critères d'exclusions :

- Le participant qui répond « OUI » à une ou plusieurs questions du questionnaire sur l'aptitude à l'activité physique (Q-AAP).
- Participant sous médication (excluant pilule contraceptif)
- Participant ne participant pas régulièrement aux entraînements de son club (trois séances/sem. minimum de natation).
- Nageur de niveau plus haut ou plus bas que le niveau provincial ou national.

## 2. CONDITIONS EXPÉRIMENTALES :

### 2.1 Test PAM en natation

Les tests de PAM en natation ont eu lieu dans un bassin 25m (température 27 degré Celsius) de Profondeur progressive brute sur 5m de 1, 34m à 3.40m et cette profondeur (3.40m) est maintenu sur les 20 mètres restante du bassin. Les participants ont évolué dans un couloir avec largeur standard de 2.5m délimité par deux câbles anti-vagues.

### 2.2 Test PAM sur ergocycle

Le test de PAM sur ergocycle (Excalibur V2.0, Groningen, Netherlands) (Figure 3.1) était exécuté dans les laboratoires de recherche du département de kinanthropologie de l'UQAM qui rencontrent les conditions de température thermoneutre (20-22 degré Celsius).

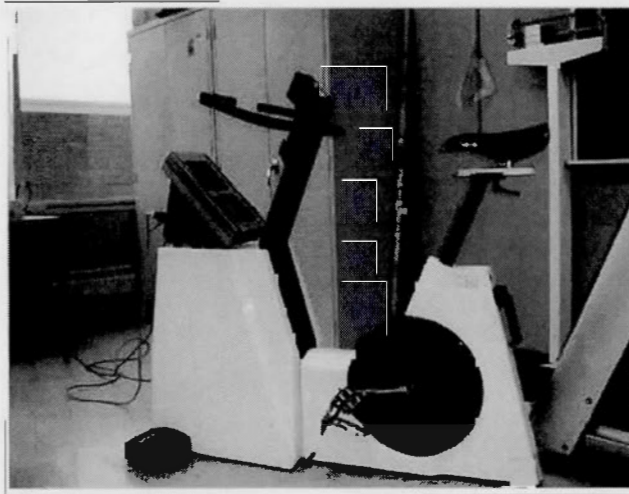


Figure 3.1 : Ergocycle Excalibur V2.0, Groningen, Netherlands.

Pour les deux tests (PAM en natation ou sur ergocycle), nous avons utilisé, tel qu'illustrés à la Figure 3.2, un système d'analyse de gaz portable (K4b2, COSMED, Italie) pour mesurer les échanges gazeux en mode cycle par cycle en temps réel.



Figure 3.2 : Système d'analyse de gaz portable (K4b2, COSMED, Italie)



Les participants ont utilisé dans la phase de prise de mesure un embout buccal qu'ils ont placé eux même dans leur bouche afin de prélever la VO<sub>2</sub> dans l'eau directement pendant les périodes de repos entre les paliers. Sur l'ergocycle les participants respiraient dans un masque facial ajusté et étanche qu'on a placé avant le début de l'effort.

### 3. .PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Les tests ont été planifiés pour le mois de mars 2014. Généralement les nageurs et triathlètes compétitifs sont en fin de période foncière de préparation générale. C'était un moment opportun d'intégrer des tests de PAM en piscine et sur ergocycle car ils ne dérangent en rien la planification des entraîneurs.

#### 3.1 Mesures anthropométriques

La taille des participants était mesurée sans souliers en position debout avec un stadiomètre (Lafayette). Pieds nus et vêtu légèrement (ex., maillot de bain), les participants étaient pesés sur une balance par bioimpédance (Body Fast Analyser, OMRON, Japan).

#### 3.2 Mesure de la fréquence cardiaque

Le capteur de la fréquence cardiaque (FC) était placé autour de la poitrine, juste en dessous des muscles pectoraux. Les électrodes rainurées étaient plaquées contre la peau afin que le moniteur de fréquence cardiaque (Polar belt T31, Polar, Fi) soit positionné à l'endroit et au centre du thorax. L'enregistrement s'est fait directement avec l'analyseur de gaz portatif (K4b2, Cosmed, It).

#### 3.3 Mesure de VO<sub>2</sub> max en natation

Les participants ont nagé sur des paliers de 2 min à une vitesse prédéterminée suivies d'une minute de repos. La collecte des gaz a eu lieu dans les trois secondes suivant l'arrêt de l'effort, et ce pendant 30 secondes, les 30 secondes restantes de la minute de

repos servaient à se replacer à l'extrémité du bassin le plus proche du participant afin de reprendre l'effort sur le palier suivant. Le test était constitué de 3 à 4 paliers d'effort d'une durée de 2 minutes chacun après 1000 m d'échauffement. La vitesse initiale a été fixée à 0,20 m/s plus lent que la vitesse moyenne du meilleur 400m de chaque participant et est augmentée de 0,05 m/s à chaque palier. Le participant était arrêté aussitôt qu'on remarque qu'il n'était plus capable de nager à la vitesse imposée par la bande sonore (selon le protocole du test maximal progressif à paliers multiples en natation de Leger et Lavoie 1985).

### 3.4 Mesure de VO<sub>2</sub> max sur ergocycle

Les participants ont pédalé sur un vélo électromagnétique à une fréquence de pédalage de 60 révolutions par minute avec une charge initiale de 0.5 KP (25 watts). L'intensité de l'exercice était augmentée de 0.5 KP toutes les 2 minutes jusqu'à épuisement du participant. Le participant retournait à la charge initiale pour faire un retour au calme de 3 minutes.

### 3.5 Variables mesurées avant et pendant les deux tests

#### - Les mesures anthropométriques:

- Masse corporelle (kg)
- Taille (cm)
- Le pourcentage de tissu adipeux par Bioimpédance
- L'indice de masse corporelle (IMC)
- L'envergure des bras

- Les mesures physiologiques :

- La fréquence cardiaque maximale (FC\_max) (battements/min-')
- La consommation maximale d'oxygène (VO<sub>2</sub> max) (ml/min/kg)
- Le volume de dioxyde de carbone produit (VC02) (ml/ min)
- Le coût énergétique (CR) (ml d'O<sub>2</sub> par m et par kg)
- La ventilation par minute (VE) (l/min)
- Le quotient respiratoire (R).

### 3.6 Variables indépendantes

Les variables indépendantes sont : la masse corporelle, la taille, le pourcentage de tissu adipeux, l'IMC, l'envergure des bras, la FC max, l'âge, le sexe et le niveau d'entraînement.

### 3.7 Variable dépendante

La consommation d'oxygène maximale (VO<sub>2</sub> max) en ml/min/kg à travers deux épreuves :

- 1- L'évaluation de la PAM sur érogocycle avec un effort progressif continu jusqu'à épuisement.
- 2- L'évaluation de la PAM en natation avec un effort intermittent sur des paliers progressifs de 2min entrecoupé par 1 min de repos

Le volume d'oxygène consommé fut identifié à la fin de chaque palier en procédant à une rétro extrapolation (BE) vers le temps « 0 » de la courbe de tendance linéaire des valeurs de (VO<sub>2</sub>) mesurées pendant les 20 premières secondes de la minute de récupération. La BE de la courbe de tendance de la dernière période de récupération suivant le dernier

palier atteint par le participant était retenue comme la valeur de consommation d'oxygène maximale (VO2 max).

### 3.8 Analyses statistiques

Les mesures de tendance centrale et de dispersion (moyenne et écart-type) ont été calculées pour chacune des variables. Les comparaisons de moyennes entre les valeurs mesurées en natation et sur ergocycle ont été réalisées à partir d'un test de t de Student pour valeurs appariées. Les équations de régression ont été calculées afin d'obtenir des équations de prédiction entre deux variables. Le seuil de signification a été établi à  $p < 0,05$ . L'analyse statistique s'est effectuée à l'aide du logiciel SPSS pour Windows version 16.0.

## 4. VALIDATION DE LA MÉTHODE RÉTROEXTRAPOLATION AVEC ANALYSEUR MÉTABOLIQUE PORTABLE

Dans l'objectif d'obtenir un protocole expérimental le plus ajusté et valide possible, nous avons procédé par une étude préliminaire. Les tests pilotes étaient administrés à deux triathlètes (Hommes) âgés de 20 et 21 ans de niveau national et deux nageuses (Femmes) âgées de 16 et 17 ans de niveau provincial.

### 4.1 Protocole et déroulement des tests préliminaires

Nous avons administré le test maximal progressif à paliers multiples en natation « PAM » dont voici les caractéristiques et les détails protocolaires;

- Bassin 25 m, température de 27 degrés Celsius, largeur du couloir 2,5 m.
- Bande sonore avec 20 paliers de 2 minutes, vitesse du premier palier 0,8 m/s et augmente de 0.05 à chaque palier.
- Les participants suivaient un intervenant qui marchait au rythme des signaux sonores (un repère était placé à 12.5m sur le bord du bassin)



- Après un échauffement libre de 15 min environ les participants partaient à l'extrémité du bassin et nageaient au rythme imposé par l'intervenant pendant 2 min.
- N.B : Considérant le bon niveau de pratique des participants et le fait d'avoir une période d'échauffement, nous n'avons pas commencé le test au premier palier pour ne pas prolonger la durée du test inutilement.
- Pendant la minute de repos, le participant respirait dans un embout buccal relié à l'analyseur des gaz portatif (k4b2 de COSMED Italie)
- Après, le participant se dirigeait à l'extrémité du bassin la plus proche pour recommencer à nager à la vitesse du palier suivant suite au signal de l'intervenant.
- Une fois que le participant n'était plus capable de suivre le rythme de marche de l'intervenant, le participant était arrêté à la fin du palier et une dernière analyse des gaz était faite sur une minute

#### 4.2 Collecte et analyse des résultats

Suite à la collecte des données, nous avons procédé à une analyse des données prises par le K4b2 lors de phase de récupération (Figure 3.3 à 3.5). Les figures représentent la VO<sub>2</sub> pendant les phases de récupération (1min) qui entrecoupaient les périodes d'effort de (2 min). Les points des graphiques représentent la VO<sub>2</sub> à chaque 6 sec (B/6S). Dans le graphique 3.5, nous illustrons les mêmes résultats du participant 2, mais cette fois les valeurs relevées de la VO<sub>2</sub> représentent la consommation d'oxygène respiration par respiration comme prélevé directement avec l'analyseur des gaz (K4b2)

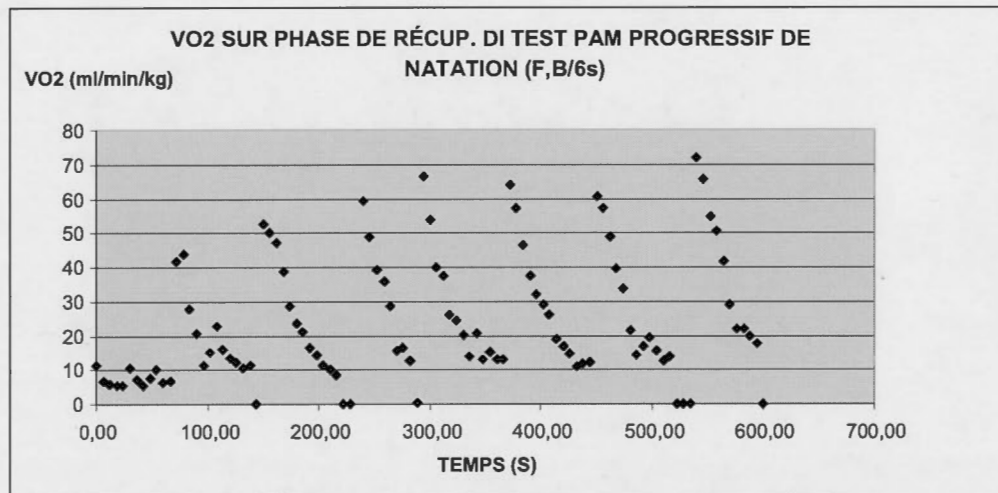


Figure3.3: VO2 pendant les phases de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement par 6 sec) (participant1)

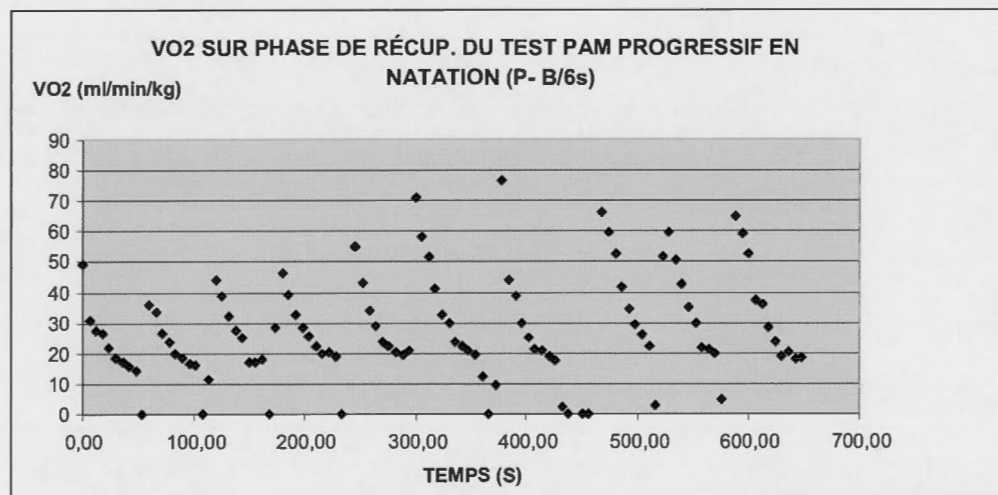


Figure 3.4 : VO2 pendant les phases de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement par 6 sec) (participant 2)

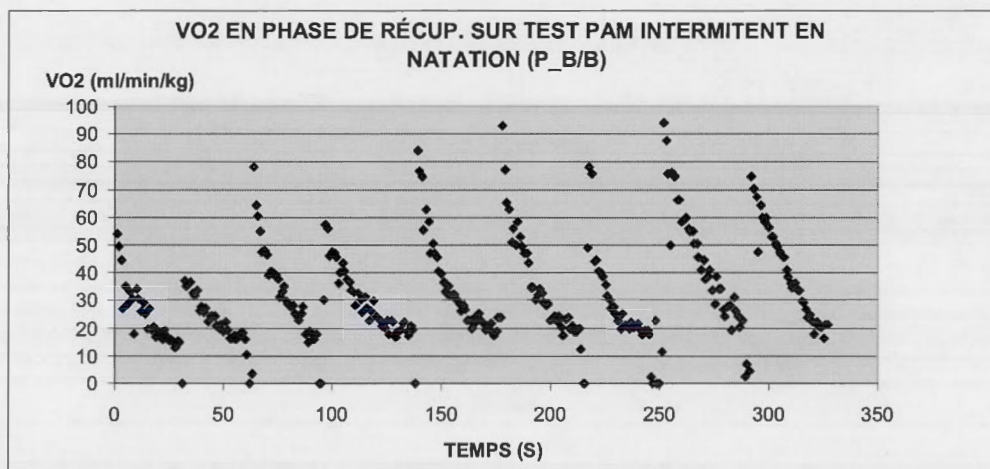


Figure 3.5 : VO2 pendant les phases de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2)

Après, nous avons présenté les courbes de consommation d'oxygène (VO2) pour chaque palier du test PAM séparément. (Figures 2.6 à 3.12). Ainsi nous pouvons procéder à une rétro extrapolation vers le temps 0 de la phase de récupération et qui représente la fin de l'effort et ainsi déduire la consommation d'oxygène à la fin de chaque palier d'effort.

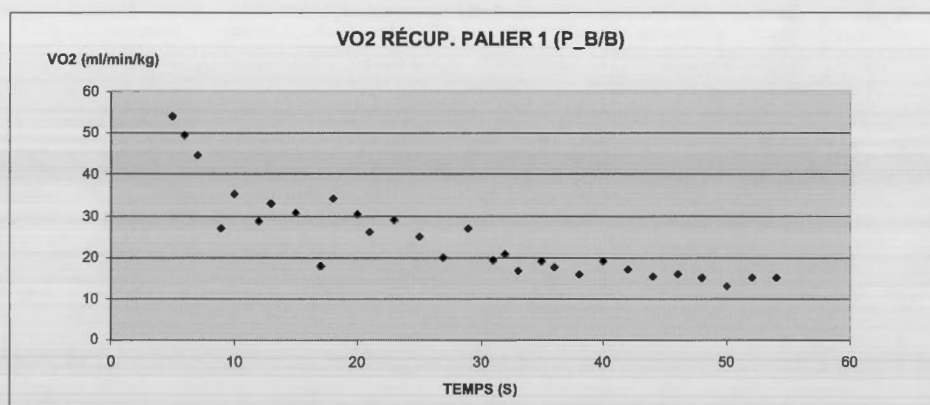


Figure 3.6 : VO2 pendant première phase de récupération (1min) du test PA Progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2)

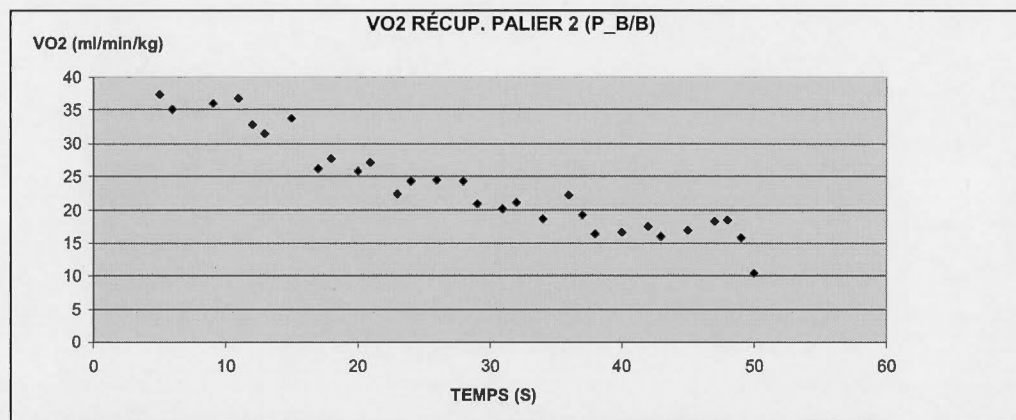


Figure 3.7 : VO2 pendant la deuxième phase de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2)

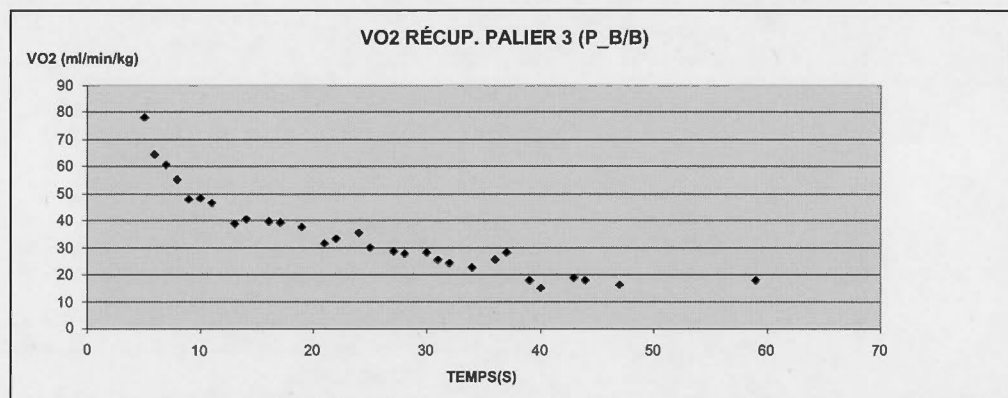


Figure 3.8 : VO2 pendant la troisième phase de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2)

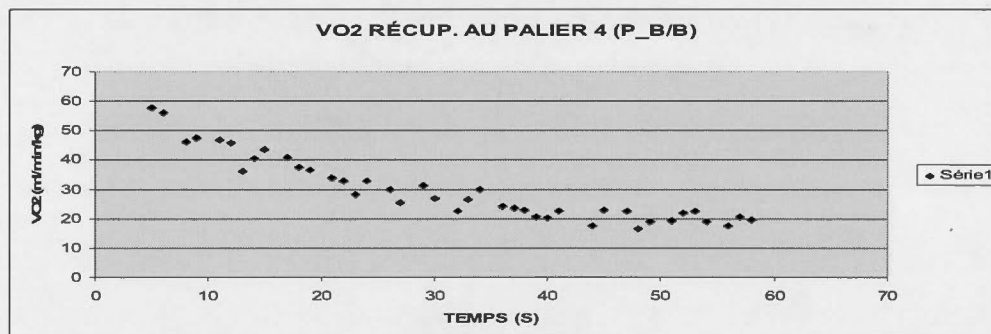


Figure 3.9 : VO2 pendant la quatrième phase de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2)



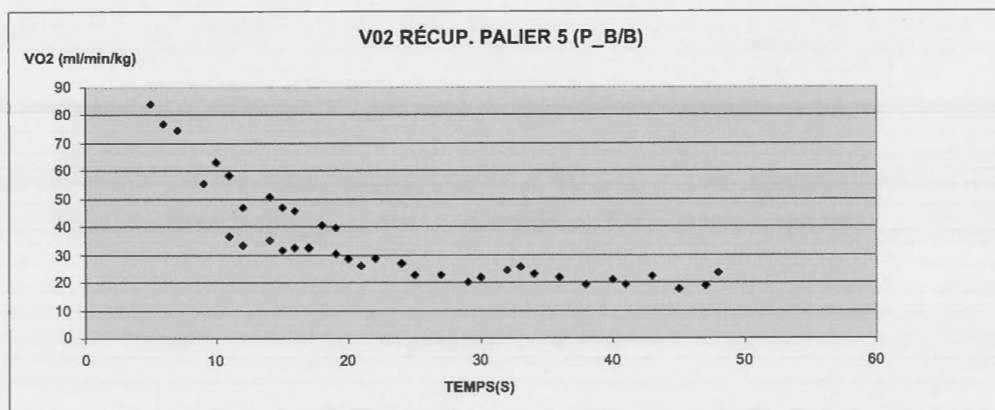


Figure 3.10 : VO2 pendant la cinquième phase de récupération (1min) du test PAM  
progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2)

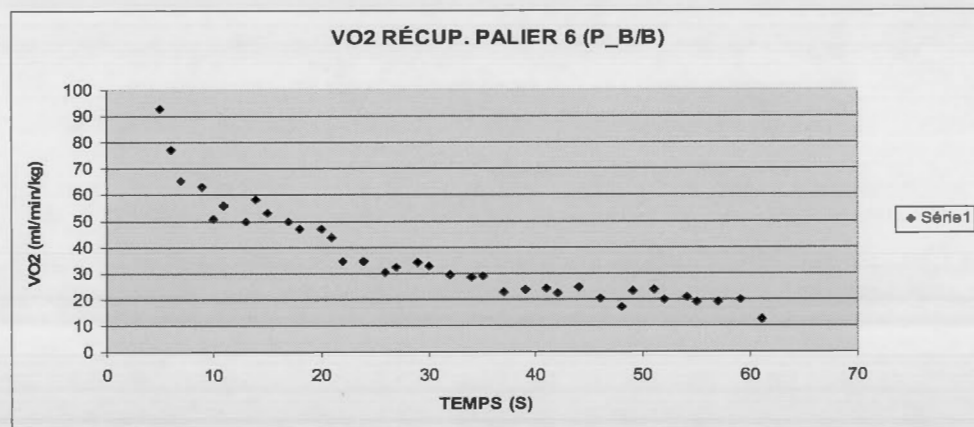


Figure 3.11 : VO2 pendant la sixième phase de récupération (1min) du test PAM  
progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2)

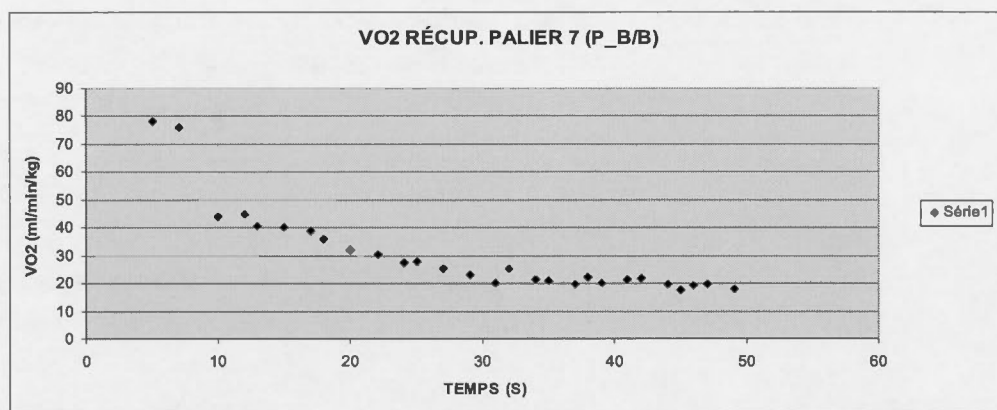


Figure 3.12 : VO2 pendant la septième phase de récupération (1min) du test PAM progressif intermittent en natation (prélèvement resp/resp) (participant 2)

Nous remarquons dans le graphique 3.13 qu'en traçant les courbes de tendance qu'il y a deux composantes. Une première composante qu'on nomme rapide de 0 à 20 sec, et une deuxième qui commence à partir de la 20ème sec et qu'on nomme lente. En se référant à la littérature et la logique mathématique, nous utiliserons la composante rapide pour appliquer la rétro extrapolation à partir de l'équation de la courbe de tendance des prélèvements des 20 premières secondes de la courbe de VO2 pendant la récupération.

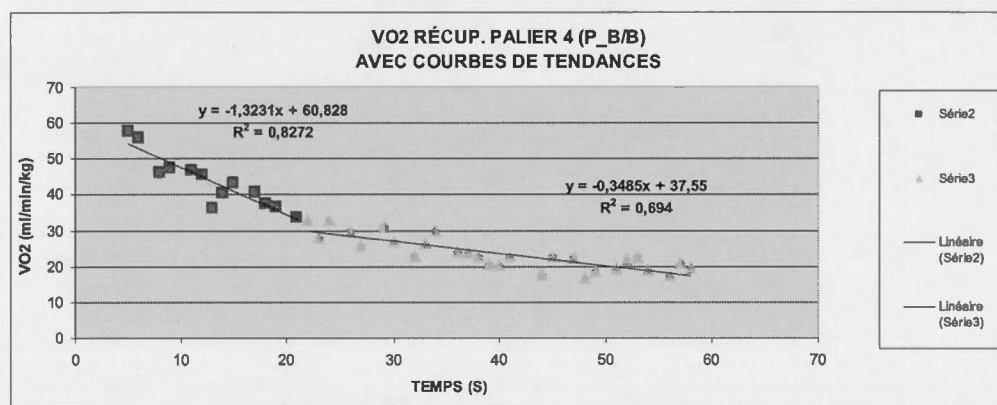


Figure 3.13 : VO2 pendant la quatrième phase de récupération (1 min) du test PAM progressif intermittent en natation avec courbe de tendance et son équation ainsi que le coefficient de détermination (R au carré) (prélèvement resp/resp)

Tableau 3.1 : Retro extrapolation logarithmique comparative de deux courbes de VO<sub>2</sub> de récupération : 20 et 30 secondes

	VO <sub>2</sub> /Kg	Logarithme Népérien	Courbe tendance sur 30 sec	Courbe tendance sur 20 sec
(S)	ml/min/Kg	(LN)	Retro- extrapolation vers X = 0 à partir de l'équation $y = -0,0288x$ $+4,1345$	Retro- extrapolation vers X = 0 à partir de l'équation $y = -0,0297x$ $+4,1491$
5	57,6	4,05	62,45	63,37
6	56,0	4,02		
8	46,1	3,83		
9	47,4	3,86		
11	46,8	3,84		
12	45,7	3,82		
13	36,2	3,59		
14	40,3	3,69		
15	43,4	3,77		
17	40,6	3,70		
18	37,6	3,62		
19	36,5	3,59		
21	33,6	3,51		
22	32,7	3,48		
23	28,0	3,33		
24	32,8	3,49		
26	30,0	3,40		
27	25,6	3,24		

Dans le cadre des tests pilotes, nous avons procédé à deux rétro extrapolations (BE) logarithmiques comparatives à partir de deux courbes de tendance. La première pour la courbe de régression VO2 sur 20 sec.

La deuxième pour la courbe de régression VO2 sur 30 sec. (Graphique 3.14 et tableau 3.1). Les valeurs de VO2 au temps 0 sont de 62,46 ml/min/kg pour BE à partir de 30 secondes de données et de 63,38 ml/min/kg pour BE à partir de 20 secondes de données.

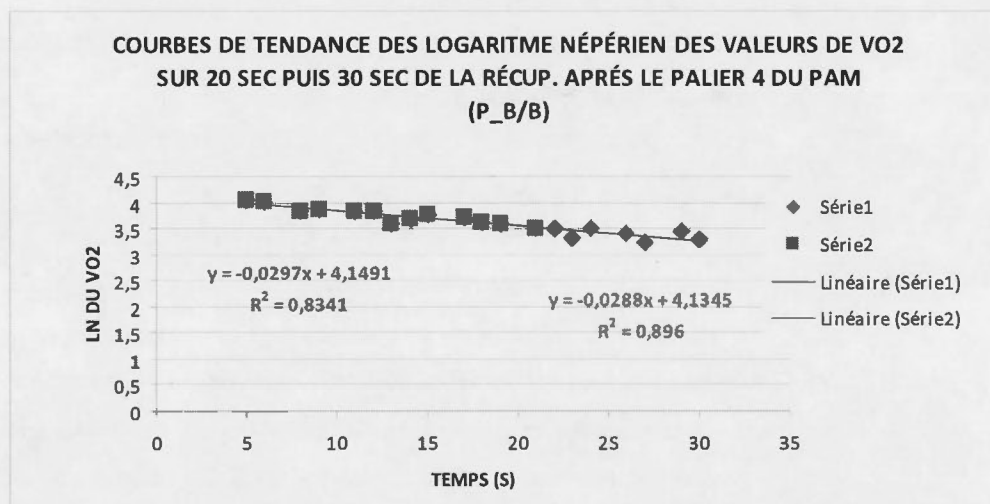


Figure 3.14 : Courbes de tendance avec équations et Coefficients de détermination des prélèvements sur les 20 puis 30 premiers secondes de récupération

#### 4.3 Ajustement du protocole expérimental

Suite aux tests préliminaires nous avons soulevé des lacunes, qu'une fois intégrées adéquatement et bien contrôlées, rendront le protocole expérimental plus valide et fidèle.

Ci-après les éléments à réajuster :



- Une explication claire et détaillée de tous les détails du protocole expérimental aux participants avant le début des tests.
- Une détermination plus rationnelle du palier de départ en se basant sur le meilleur temps sur 400m.
- Une bonne coordination entre les trois intervenants qui administrent le protocole expérimental. À savoir ; le responsable de la bande sonore, le chronométrateur/lièvre et l'opérateur de l'analyseur des gaz. :
  1. le responsable de la bande sonore : Il opère le lecteur CD, d'abord en choisissant le bon palier de départ et doit être vigilant à la fois aux signaux sonores et aux signes du chronométrateur/lièvre.
  2. Le chronométrateur/lièvre : c'est lui qui orchestre le protocole expérimental, car c'est lui qui donne le départ du test, donne la cadence de nage au participant en marchant sur le bord de la piscine en suivant le rythme des signaux sonores, annonce le temps écoulé sur chaque palier et fait un compte à rebours à 10 sec de la fin de chaque palier pour avertir le participant (pour retenir son souffle), et les deux autres intervenants pour arrêter le lecteur de la bande sonore et d'anticiper le point d'arrêt du participant pour qu'il puisse respirer dans l'embout relié au K4b2 à l'intérieur du délai de 3sec après l'arrêt de l'effort. Il chronomètre le temps de repos et le temps de prélèvement des gaz.
  3. l'opérateur de l'analyseur des gaz : En plus d'être responsable de la préparation du K4b2 (calibration, mise en marche, entrée des données relatives aux participants), il doit être très vigilant aux signes du chronométrateur pour anticiper les points d'arrêts et pour faire du marquage pour synchroniser les lectures avec les temps d'effort et de repos lors du déroulement du test.
- Réduire le temps de prélèvement des gaz à 30 secondes vu qu'on se base pour faire la rétro extrapolation uniquement sur les données des 20 premières secondes. Ainsi nous permettrons au participant sur les 30 secs restantes de se replacer à l'extrémité

la plus proche du bassin au cas où il arrête l'effort en sortant d'un virage ou avant de toucher le mur.

- Utiliser un pince-nez plus adapté à la nage à haute intensité pour éviter sa perte pendant l'effort et avoir une analyse des gaz juste et valide.

## 5. COLLECTE DES DONNEES ET ANALYSE DES RESULTATS

### 5.1 Mesures anthropométriques

En plus des mesures anthropométriques (Taille (cm), poids (kg), indice de masse corporelle et masse maigre, et pourcentage des tissus adipeux (%)) nous rapportons dans le tableau 6 la discipline sportive pratiquée par les participants (Natation ou triathlon) ainsi que leurs meilleures performances sur 400 m nage libre (crawl) et leurs âges.

### 5.2 Protocole expérimental et mesures

Lors du protocole expérimental, nous avons procédé selon la chronologie suivante :

#### 1- Prise des mesures anthropométriques.

#### 2- Test progressif à paliers multiples sur ergocycle selon le protocole suivant :

- 10min à 50 W, puis une progression sur des paliers de 2min par 50W. Le test est arrêté quand le participant n'est plus capable de maintenir une fréquence de 60 rpm.
- L'analyse des gaz directs pendant l'effort avec l'analyseur métabolique portatif COSMED- Italy. (Graphique 3.15)

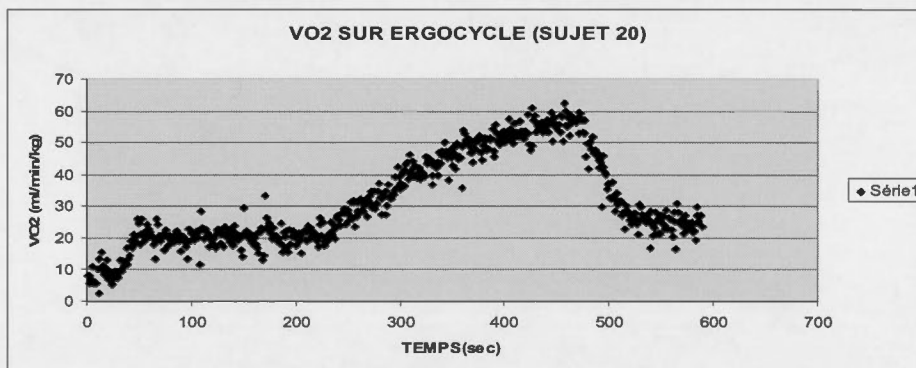


Figure 3.15 : Consommation d'oxygène pendant le test maximal progressif à paliers multiples sur ergocycle. (participant 20)

### 3- Test progressif intermittent en natation selon le protocole de (Leger 1985)

- 15 min d'échauffement suivi de nage à vitesse contrôlée sur des paliers préalablement déterminés selon la meilleure performance du participant sur 400 m. Le participant nageait 2 à 3 paliers plus lentement que sa vitesse moyenne sur 400m et progressait sur les paliers jusqu'à ce qu'il ne soit plus capable de suivre la vitesse imposée. Les paliers duraient 2 min et les périodes de repos 1min. L'analyse des gaz se faisait pendant les 30 premières secondes suivant l'effort. Un délai de 3 secs était respecté avant la prise de la première expiration dans l'embout buccal. (Graphique 3.16)

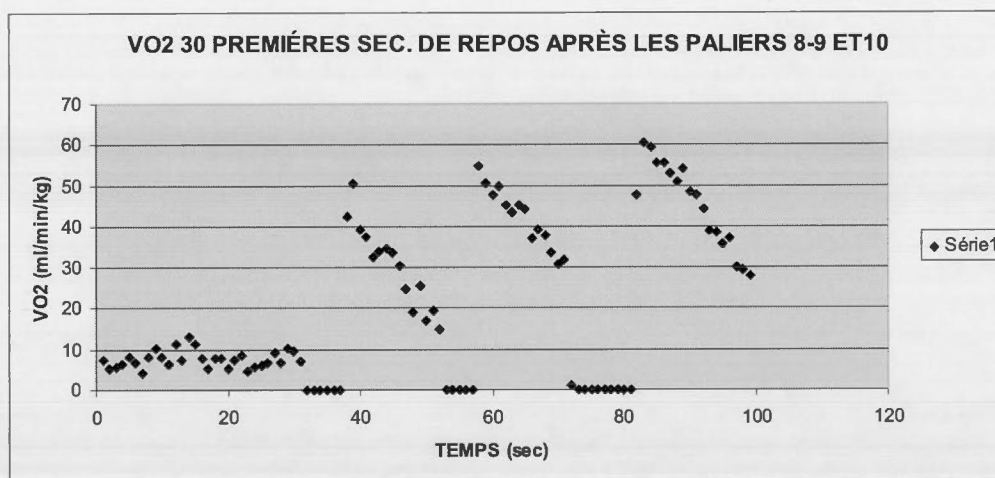


Figure 3.16 : Consommation d'oxygène pendant les périodes de repos 3 sec après les  
Les paliers de 2 min d'effort (participant 20)

La consommation d'oxygène maximale est déduite par rétro extrapolation de la courbe de tendance de la consommation d'oxygène de repos vers le temps 0 ( $x = 0$ ) suivant l'équation de la courbe de tendance ( dans le cas du sujet 20 :  $y = 0,7748 x + 62,312$ ). (Graphique 3.17)

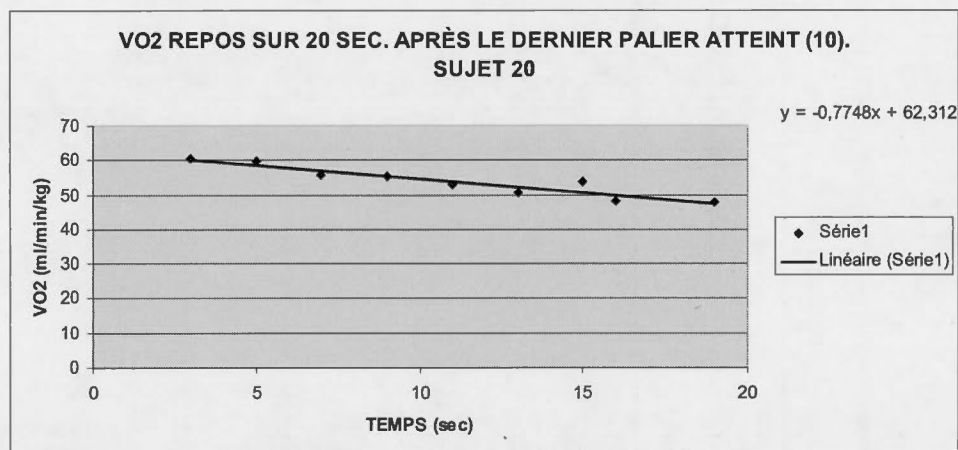


Figure 3.17 : Courbe de tendance de VO2 des 20 premières secondes de repos suivant le dernier palier atteint par le participant 20



Tableau 3.2 : Récapitulatif des mesures anthropométriques et discipline sportive pratiquée par les participants

	Discipline	Âge (année)	Temps sur 400m (min:sec)	Poids (Kg)	Taille(cm)	IMC	% Des tissus adipeux	Masse, maigre
1	TRIATHLÈTES	41	07:44	57,7	161	20,7	23,9	43,9
2		29	07:14	78,8	180	24,3	15	67,0
3		37	06:25	64,5	172	22	28,7	46,0
4		35	06:21	69,6	174,5	22,9	16,4	58,2
5		31	07:10	72,2	173	24,1	23,8	55,0
6		44	06:57	86,1	176	27,8	26,8	63,0
7		20	04:28	70,6	179	21,9	18,1	57,8
8		23	04:30	65	169,7	22,6	14,7	55,4
9		17	05:00	58,7	172	19,9	7,5	54,3
10		17	04:17	62,7	171,7	21,3	13	54,5
11	NAGEURS	22	04:15	70,4	177	22,7	18,7	57,2
12		16	03:57	76,6	174	25,2	19,9	61,4
13		18	04:02	84,9	178,2	26,8	18,7	69,0
14		19	04:02	71,4	182	21,6	15,3	60,5
15		16	04:28	66,3	163	25,1	39,8	39,9

	Discipline	Âge (année)	Temps sur 400m (min:sec)	Poids (Kg)	Taille(cm)	IMC	% Des tissus adipeux	Masse, maigre
16	NAGEURS	18	04:10	74,2	180	22,9	15,7	62,6
17		19	04:02	66,2	181,5	20,1	14,3	56,7
18		20	03:57	88,6	186	25,6	26,5	65,1
19		18	04:45	58,7	158,7	23,8	34,8	38,3
20		14	05:00	53,8	163,2	20,3	25,8	39,9
21		20	04:15	62,5	167,6	22,3	17	51,9
22		19	04:40	55,3	157,2	22,4	30,6	38,4
23		13	04:52	54,4	168,3	19,3	24,3	41,2
24		20	04:05	75	178,5	23,9	16,6	62,6
25		18	04:07	75,5	180	23,3	19,8	60,6
26		22	04:19	66	172	22	24,3	50,0
MOYENNES		21,92	4:55	67,63	172,75	22,58	20,97	53,58
ECARTYPES		7,29	1:08	9,16	7,91	1,90	7,49	9,41

### 5.3 vitesses de nage et consommation d'oxygène extrapolé

Dans le tableau 3.3, nous rapportons les résultats obtenus suite au test progressif sur ergocycle (TPE) et sur test progressif en natation (Leger 1985) (TPN). Ainsi qu'un comparatif des vitesses atteintes lors du dernier palier du TPN et les vitesses moyennes sur 400 m nage libre.

Tableau 3.3 : Récapitulatif des vitesses atteintes et la consommation d'oxygène absolue et relative

Code numérique	Temps sur 400m (min:sec)	Vitesse sur 400m (m/sec)	Vitesse du dernier palier (VAM) (m/s)	VO2 du dernier palier NATATION (ml/min/kg)	Poids (Kg)	Masse maigre (kg)	VO2 absolu du dernier palier NATATION (ml/min)	VO2max absolu sur ERGOCYCLE (ml/min)
1	07:44	0,86	0,9	42,95	57	43,91	2448,15	2493,66
2	07:14	0,92	1	46,92	79	66,98	3706,68	4095,13
3	06:25	1,04	1,15	52,19	64	45,99	3340,16	2969,21
4	06:21	1,05	1,15	57,03	69	58,19	3935,07	4097,52
5	07:10	0,93	0,95	52,16	72	55,02	3755,52	3433,49
6	04:28	1,49	1,45	73,63	70	57,82	5154,10	4718,50
7	04:30	1,48	1,45	67,6	65	55,45	4394,00	3966,31
8	05:00	1,33	1,35	77,01	59	54,30	4543,59	4151,85
9	04:17	1,56	1,55	71,48	62	54,55	4431,76	4096,80
10	04:15	1,57	1,55	74,83	70	57,24	5238,10	3977,33



Code numérique	Temps sur 400m (min:sec)	Vitesse sur 400m (m/sec)	Vitesse du dernier palier (VAM) (m/s)	VO2 du dernier palier NATATION (ml/min/kg)	Poids (Kg)	Masse maigre (kg)	VO2 absolu du dernier palier NATATION (ml/min)	VO2max absolu sur ERGOCYCLE (ml/min)
11	04:02	1,65	1,6	71,63	84	69,02	6016,92	4699,33
12	04:02	1,65	1,6	67,33	71	60,48	4780,43	3900,73
13	04:28	1,49	1,45	60,85	66	39,91	4016,10	3194,88
14	04:10	1,60	1,5	64,99	74	62,55	4809,26	3749,11
15	04:02	1,65	1,6	77,55	66	56,73	5118,30	3575,57
16	03:57	1,69	1,65	71,71	88	65,12	6310,48	5456,45
17	04:45	1,40	1,35	65,97	58	38,27	3826,26	3021,82
18	05:00	1,33	1,25	62,31	53	39,92	3302,43	3070,02
19	04:15	1,57	1,55	68,82	62	51,88	4266,84	3742,04
20	04:40	1,43	1,4	65,75	55	38,38	3616,25	3059,15
21	04:52	1,37	1,4	67,22	54	41,18	3629,88	3332,43
22	04:05	1,63	1,6	66,66	75	62,55	4999,50	4350,23
23	04:07	1,62	1,55	69,42	75	60,55	5206,50	4234,77
24	04:19	1,54	1,45	63,56	66	49,96	4194,96	3711,74
<b>Moyennes</b>	<b>04:57</b>	<b>1,40</b>	<b>1,39</b>	<b>64,98</b>	<b>68,31</b>	<b>54,24</b>	<b>4376,72</b>	<b>3795,75</b>
<b>Ecartypes</b>	<b>1:11</b>	<b>0,27</b>	<b>0,23</b>	<b>9,07</b>	<b>9,66</b>	<b>9,33</b>	<b>893,83</b>	<b>666,32</b>



#### 5.4 Comparatif entre VO<sub>2</sub>max sur ergocycle et en natation

La figure 3.18 illustre la comparaison entre la consommation d'oxygène à l'épreuve de natation (VO<sub>2</sub>peak TPN) et sur ergocycle (VO<sub>2</sub>peak). Naturellement toutes les valeurs sont réparties d'une façon équilibrée autour de la ligne de régression, mais la grande majorité des points sont situés au-delà de la ligne d'identité.

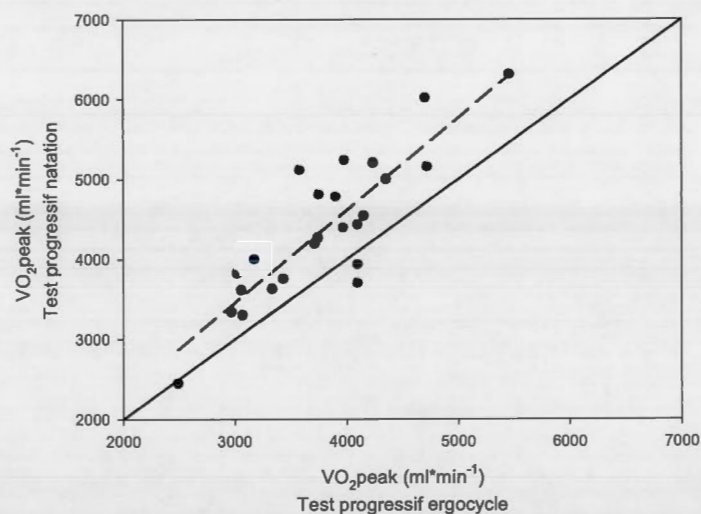


Figure 3.18 : distribution des valeurs de consommation d'oxygène absolue sur ergocycle et natation au tour de la ligne d'identité.

#### 5.5 La consommation maximale d'oxygène et la vitesse maximale du test

##### Progressif en natation

Dans la figure 3.19 nous constatons une distribution équilibrée autour de la ligne de régression des valeurs de la consommation maximale d'oxygène (VO<sub>2</sub>peak) et les vitesses maximales atteintes aux derniers paliers du test Progressif à paliers multiples en natation (Vpeak). Le coefficient de corrélation est de  $r^2=0,72$  et une marge d'erreur de  $SEE=4,7 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

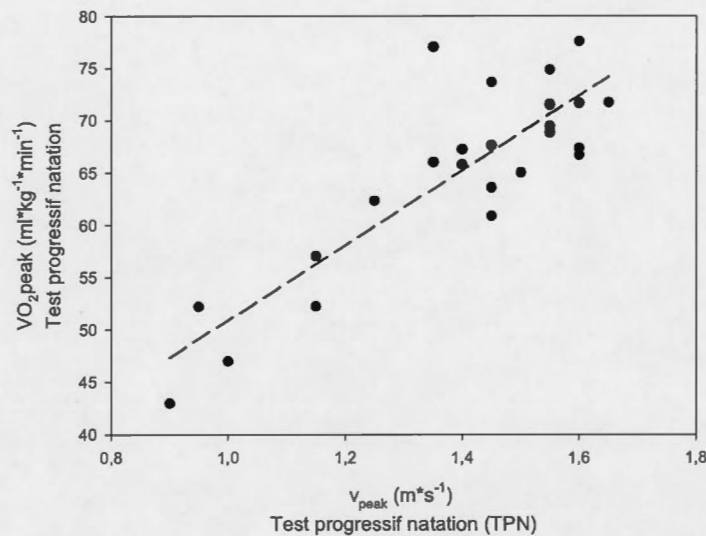


Figure 3.19 : Prédiction de la valeur de crête de la consommation d'O<sub>2</sub> à partir de vitesse peak TPN :  $VO_{2peak} (ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}) = 35,8 \cdot V_{TPN} (m \cdot s^{-1}) + 15,1$  ( $r^2 = 0,74$ , SEE  $4,7 ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ )

#### 5.6 La vitesse de nage sur 400m et vitesse maximale du test progressif en

##### Natation

La figure 3.20 illustre la forte corrélation entre la vitesse des meilleures performances sur 400m nage libre des participants ( $V_{peak}$  test 400m) et la vitesse maximale atteinte lors du test progressif de natation ( $V_{peakTPN}$ ) avec un indice de corrélation de  $r=0,97$  et une marge d'erreur de  $SEE=0.04 m \cdot s^{-1}$ .

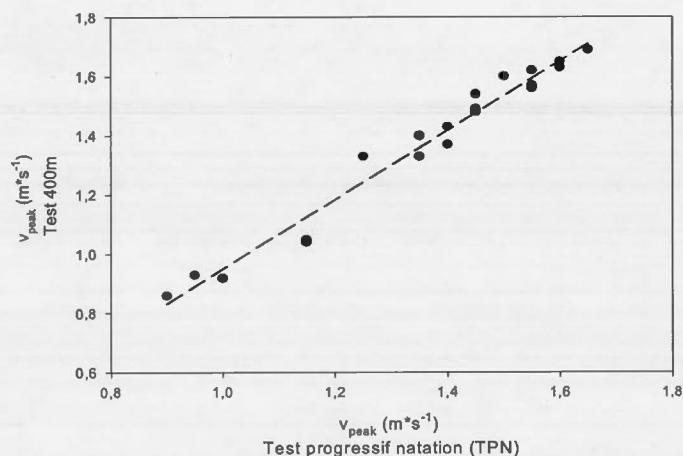


Figure 3.20 : Prédiction de la Vitesse du 400m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) à partir vitesse peak TPN :

$$V_{400m} = 1,17 \cdot V_{TPN} (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) - 0,22 \quad (r = 0,97, \text{SEE } 0,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})$$

### 5.7 Vitesse sur 400m et consommation maximale d'oxygène sur test progressif en natation

Nous avons constaté une bonne distribution autour de la ligne de régression de la Vitesse Prédite sur 400m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) à partir  $\text{VO}_2$  peak TPN ( $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ) comme illustré dans la figure 3.21. Nous soulevons un indice de corrélation de  $r^2 = 0,72$ , ainsi qu'une marge d'erreur de SEE  $0,14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

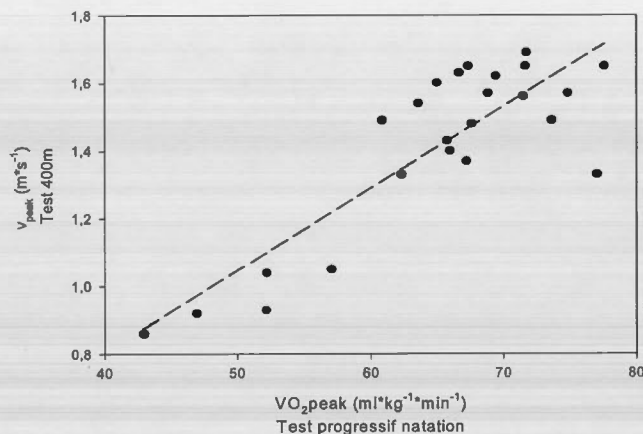


Figure 3.21 : Prédiction de la vitesse 400m ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) à partir  $\text{VO}_2$  peak TPN :

$$V_{400m} = 0,024 \cdot \text{VO}_{2\text{peak TPN}} (\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}) - 0,16 \quad (r^2 = 0,72, \text{SEE } 0,14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})$$

### 5.8 Spécificité du test et différence en pourcentage (%) entre la VO<sub>2</sub> sur ergocycle et en natation

Les graphiques 3.22 et 3.23 nous illustrent la différence des résultats (VO<sub>2</sub> ml/min/kg) obtenus selon les tests (Natation Vs Ergocycle) ainsi que selon la spécialité des participants (Triathlètes Vs Nageurs). Cette comparaison reflète l'aspect de spécificité que revêt le test (TPN) et qui renforce encore une fois sa validité.

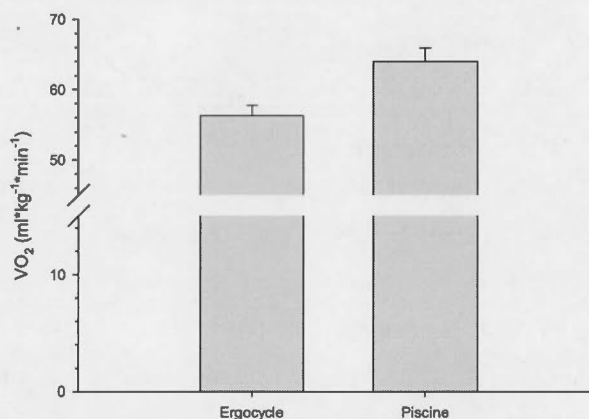


Figure 3.22 : Consommation d'oxygène (VO<sub>2</sub>max) en natation Vs Ergocycle

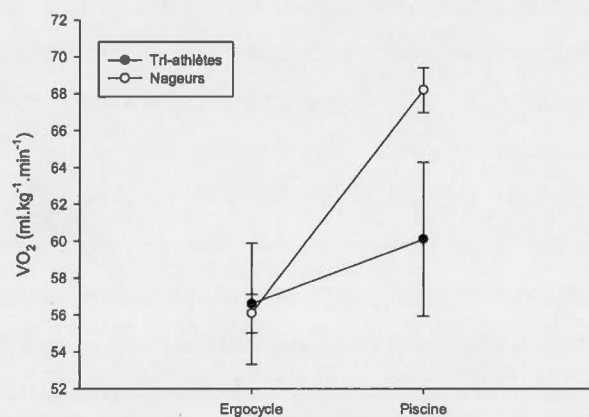


Figure 3.23 : Consommation d'oxygène (VO<sub>2</sub>max) Triathlètes Vs Nageurs



## 6. DISCUSSION :

La présente étude a pour objet d'investiguer le test de puissance aérobie en natation de Léger 1985 pour vérifier sa validité et fidélité dans le contexte actuel de 2014. Nous avons procédé par la vérification des valeurs de consommation d'oxygène  $\text{VO}_2$  (ml/min) en natation selon le protocole de Léger 1985 ( $\text{VO}_{2\text{Nat.}}$ ) obtenu par la retro extrapolation au temps : 0 de la récupération après l'effort. En les comparant à des valeurs de  $\text{VO}_2$  (ml/min) obtenues lors de test progressif à paliers multiples sur ergocycle ( $\text{VO}_{2\text{Erg.}}$ ). Nous constatons un bon niveau de corrélation ( $R^2=0,74$ ) (Figure 3.20) avec une supériorité des valeurs de  $\text{VO}_{2\text{Nat.}}$  (Moyenne : 4376,72 ml/min) par rapport aux valeurs de  $\text{VO}_{2\text{Erg.}}$  (Moyenne : 3795,75 ml/min). Cela est dû à l'aspect spécifique du test de natation sachant que le groupe expérimental est constitué principalement de 15 nageurs et 9 triathlètes âgés de 21,92 ans ( $\pm 7,29$ ),  $\text{VAM}=(1,39 \text{ m.s}^{-1}) (\pm 0,23)$ . Aussi, il ne faut pas négliger la supériorité de la masse musculaire sollicitée en nageant par rapport au pédalage. Ce qui explique le positionnement de la majorité des valeurs au-delà de la ligne d'identité dans la figure 3.16. Les résultats obtenus avec la présente étude sont similaires à ceux obtenus par Montpetit et coll., (1981) avec 28 nageurs âgés de 14,6 ans et une  $\text{VAM}$  à la natation de 1,39 m. s<sup>-1</sup> avec la méthode de rétro-extrapolation pour mesurer la PAM en natation (technique sacs Douglas). Dans leur étude, 75% des participants ont obtenu une  $\text{VO}_{2\text{peak}}$  plus élevée en natation (3,37 L/min) que sur tapis roulant (3,23 L/min). Les mêmes auteurs confirment que les vitesses atteintes lors du test progressif en natation avec mesure indirecte de la consommation via retro extrapolation (TPN) lors des derniers paliers étaient 10% plus élevées que les vitesses atteintes lors du même test, mais avec la méthode conventionnelle de collecte directe des gaz pendant la nage (technique sacs Douglas). Confirmant ainsi l'aspect spécifique prépondérant du test progressif en natation, car celui-ci permet l'utilisation optimale des muscles sollicités en natation et exploite d'une façon maximale le rendement mécanique de chaque segment du geste technique du nageur. Dans une étude plus récente de Jurimae et col. 2007, 29 nageurs dont 15 prés pubères ( $11,9 \pm 0,3$  ans) et 14 pubères ( $14,3 \pm 1,4$  ans) subissant un test progressif sur ergocycle et un 400 m crawl suivi d'une mesure indirecte de la

consommation d'oxygène par rétro-extrapolation, les mesures de  $VO_{2peak}$  obtenues sur ergocycle et en natation n'étaient pas significativement différentes même si cette fois les valeurs sur ergocycle étaient légèrement supérieures de celles obtenues en natation (bicycle,  $2.86 \pm 0.74$  L/min, vs in water,  $2.53 \pm 0.50$  L/min;  $r = .850$ ,  $p = .0001$ ). Cependant la VAM moyenne dans le groupe était de 1,05 m.s<sup>-1</sup> ce qui reflète le niveau de ces nageurs qui était nettement plus bas que le groupe de la présente étude ou même du groupe de Montpetit et coll. 1981 (VAM= 1,39 ou 1,40 m.s<sup>-1</sup>) chez qui le processus de spécialisation est bien entamé et le rendement mécanique en natation est plus élevé que sur un autre mode locomoteur (course ou pédalage). Cela nous mène à parler d'un aspect important de la présente étude, qui est la corrélation entre la consommation d'oxygène ( $VO_{2peak}$ ) et la vitesse aérobie maximale (VAM) en natation. Cet aspect qui est bien reflété par la figure 3.17 ( $r^2 = 0,74$ , SEE 4,7 ml\*kg<sup>-1</sup>\*min<sup>-1</sup>).

Poujade et coll., 2003, confirme cette étroite relation entre la VAM et le coût énergétique. Onze participants âgés de 12,4 ( $\pm 0,53$ ) ans nageant de 7,5–8,5 heures par semaine ont pris part à son étude. La consommation maximale d'oxygène a été mesurée à la fin d'une performance maximale sur 400 m crawl. Le coût énergétique a été calculé à 3 vitesses sous-maximales (0,9, 1 et 1,1 m s<sup>-1</sup>). La consommation maximale d'oxygène était de 2,19 l min<sup>-1</sup> ( $\pm 0,38$ ) pour une vitesse maximale aérobie de 1,19 m s<sup>-1</sup> ( $\pm 0,03$ ) et une performance de 5 min 35 s ( $\pm 10$  s) sur 400 m crawl. Les valeurs de coût énergétique à 0,9, 1 et 1,1 m s<sup>-1</sup> sont respectivement de 29,27 ( $\pm 3,13$ ), 30,25 ( $\pm 3,68$ ) et 32,91 ( $\pm 3,59$ ) ml kg<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. Les différences de performance sur 400 m crawl ne sont pas expliquées par les caractéristiques biométriques ou par le coût énergétique à 0,9 et 1 m s<sup>-1</sup>. Cependant, la performance sur 400 m crawl est corrélée au coût énergétique à 1,1 m s<sup>-1</sup> ( $r = 0,82$  ;  $p < 0,01$ ) et à la consommation maximale d'oxygène ( $r = 0,87$  ;  $p < 0,001$ ).

Dans notre étude, nous avons eu une très forte corrélation entre la vitesse moyenne de la meilleure performance sur 400m crawl des participants et la vitesse du dernier palier complété lors du TPN ( $r^2 = 0,97$ , SEE 0,04 m\*s<sup>-1</sup>) et qui normalement correspond à la VAM. (Figure 3.18). Sachant que pour optimiser la précision de la VAM atteinte lors du

dernier palier, nous avons préconisé faire nager les participants à partir des paliers où la vitesse de nage imposée est plus lente que la vitesse moyenne sur leur meilleur performance sur 400m d'environ  $0,15 \text{ m.s}^{-1}$  ou  $0,20 \text{ m.s}^{-1}$  après un échauffement d'environ de 800m à 1000m varié (nage complète, éducatifs, et quelques courtes accélérations pour l'activation), suivi d'un repos passif d'environ 10 minutes. Cette procédure nous a permis d'éviter la fatigue musculaire qui aurait pu être provoqué en exposant les participants au protocole complet du TPN (Léger 1985) et en les faisant nager à partir du premier palier dont la vitesse est de  $0,90 \text{ m.s}^{-1}$ .

Pour compléter le processus d'analyse des résultats obtenus, nous avons vérifié la corrélation entre la vitesse sur 400m  $V_{\text{peak}}$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ) et la consommation aérobie maximale  $\text{VO}_{2\text{peak}}$  TPN ( $\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ) (figure 3.19). Nous avons soulevé une bonne distribution des valeurs autour de la ligne de régression ce qui révèle un bon niveau de corrélation ( $r^2 = 0,72$ , avec une faible marge d'erreur; SEE  $0,14 \text{ m.s}^{-1}$ ).

Comme le confirme Léger (2013), l'important est de réaliser que la VAM est corrélée à la  $\text{VO}_{2\text{max}}$  mesurée en natation. Car la VAM est une valeur pertinente pour l'entraîneur qui l'utilise pour doser l'intensité d'entraînement des nageurs.

Léger (2013) revient sur la limite principale de l'évaluation des aptitudes aérobie et ajoute que sur ergocycle et sur tapis roulant, l'erreur aléatoire due au rendement mécanique est d'environ 5 % alors qu'à la natation, elle est de l'ordre de 15 % en raison des plus grandes variations interindividuelles de  $\text{VO}_2$  à telle ou telle vitesse. À la natation toutefois, il est possible de diminuer l'erreur aléatoire à 11 % en ajoutant un deuxième prédicteur comme la fréquence des mouvements de bras à la vitesse du dernier palier pour prédire  $\text{VO}_{2\text{max}}$  Lavoie et coll. 1985. Cette marge d'erreur demeure quand même appréciable et elle peut être encore plus grande chez des participants avec une technique de nage défaillante (Figure 3.24).

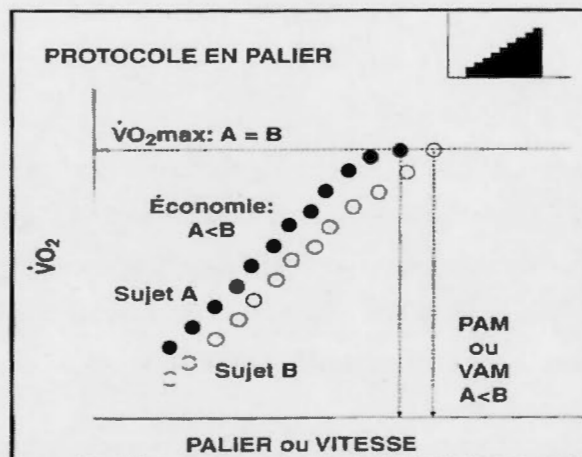


Figure 3.24 : Illustrations des notions de  $\dot{V}O_{2max}$ , VAM et économie pour deux participants différents lors d'une épreuve à paliers multiples.

Dans notre étude les aspects d'économie et de spécificité se sont bien illustrés car la valeur de  $\dot{V}O_2$  était en général  $15,5\% \pm 1,9\%$  plus élevée à la nage que sur l'ergocycle. Toutefois, les nageurs ont montré une valeur de  $\dot{V}O_2$   $21,6\% \pm 1,3\%$  plus élevée (différence significative) à la nage et les tri-athlètes  $6,2\% \pm 4,3\%$  plus élevé (différence significative) (figures 3.20 et 3.21)

Sur la figure 3.21 nous constatons que la différence de  $\dot{V}O_2$  entre nageur et triathlète sur ergocycle n'était pas significative. Toutefois, à la nage, la différence entre nageur et triathlète est significativement différent. Ce qui renforce encore une fois l'importance de l'aspect de spécificité dans la validité du test.



## CHAPITRE IV

### CONCLUSION

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire ont permis de confirmer la validité et surtout la fidélité du test progressif à paliers multiples en natation (Léger 1985) (TPN) dans le contexte actuel avec tous les changements technologiques au niveau de l'instrumentation ou le niveau technique des nageurs actuels malgré la disparité de leur niveau jusqu'à une certaine limite de maîtrise technique.

Les résultats obtenus tendent à confirmer la corrélation entre la vitesse moyenne sur 400 m crawl et la vitesse du dernier palier atteint lors du TPN ( $r^2 = 0,97$ , SEE  $0,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Ce qui confirme que les vitesses maximales atteintes au 400m peuvent être considérées comme des Vitesses aérobies maximales (VAM) et du coup des vitesses de référence aux entraîneurs pour fixer les vitesses d'entraînement et les vitesses spécifiques de courses. La corrélation obtenue entre la vitesse atteinte au dernier palier du TPN ( $V_{\text{peak}} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) et la consommation d'oxygène mesurée ( $\text{VO}_{2\text{peak}} \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) ( $r^2 = 0,74$ , SEE  $4,7 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ) vient renforcer la dominance de l'aspect aérobic de la vitesse moyenne sur 400m crawl, ce qui donne une alternative aux entraîneurs pour évaluer la VAM des nageurs. À travers l'étude, un élément pertinent nous a paru important dans l'évaluation de la puissance aérobic et la vitesse aérobic maximale, c'est le coût énergétique (CÉ) (en  $\text{mL d'O}_2$  par m et par kg). Il est le facteur déterminant reliant la consommation d'oxygène ( $\text{VO}_{2\text{max}}$ ) et la vitesse aérobic maximale (VMA)  $\text{VMA} = \text{VO}_{2\text{max}} / \text{CR}$ . L'efficacité technique devient ainsi un élément aussi déterminant que la  $\text{VO}_{2\text{max}}$  pour améliorer la VAM.

## RÉFÉRENCES

- American College of Sport Medecin (ACSM), Manual for Guidelines for Exercice Testing and Prescription. Fourth edition. Lippincott Williams & Wilkins. USA. 2001.
- Astrand P.O., et Rodahl K. Manuel de physiologie de l'exercice musculaire.,1973, Masson édit., 606 pp.
- Astrand P.O., et Englesson S. A swimming flume. J. Appl. Physiol., 1972, 33: 514.
- Bassett D.R. Jr, Howley E.T., Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. Med. Sci. Sports Exerc. 2000, 32: 70-84.
- Cazorla G. , Montpetit R. R. , Fouillot J.-P., Cervetti J.-P. Etude méthodologique de la mesure directe de la consommation maximale d'oxygène au cours de la nage. Cinésiologie, 1982, XXI : 33-40.
- Costill David L. :I.N.S.E.P. , F.F.N. Spécial sport natation volume 1: comptes rendus des conférences à l'I.N.S.E.P., I.N.S.E.P., 1978
- Costill D.L. Effects of water temperature on aerobic work capacity. Research Quart., 1968, 39 : 67-73.
- Counsilman J.E. Forces in swimming two types of crawl stroke. Research Quart., 1955, 26 : 127-139.
- Coyle E.F., Coggan AR, Hemmert MK & Ivy JL. Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate. J Appl Physiol 1986, 61,165-172.
- Cureton T.K., A test for endurance in speed swimming. Research Quart., 1935,6: 106-112.

- Cureton T.K., Relationship of respiration to speed efficiency in swimming. Research Quart., 1930, b.1 : 54-70.

Cureton T.K. Mechanics and kinesiology of swimming (The crawl flutter kick). Research Quart., 1930, a.1 : 87-121

- Dill D.B., et Saitor B. Exercice the oxygen debt. J. Sports Med. Phys. Fitness, 1962, 2 : 66.

- Di prampero P.E., Pendergast D.R., Rennie D.W., et Wilson D.W., Energetics of swimming man. J. Appl. Physiol., 1974, 37 : 1-5.

- Doherty M, Balmer J., Davison R.C., Robinson L., Smith P.M.. Reliability of a combined 3-min constant load and performance cycling test. Int J Sports Med. 2003, 24: 366 371

- Dubois-Reynolds R. Zur physiologie des nageurs, archive : anatomie et physiologie, 1905, 22 : 252-278.

- Gordon S. and Laurel T. M., The validation of backward extrapolation of submaximal oxygen consumption from the oxygen recovery curve. Department of human movement studies, The University of Queensland, St. Lucia, Qld, Australia, 4067, 1991

- Hill A.V. and H. Lupton, Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilisation of oxygen. Q.J. Med. 1923, 16:135-171.

- Huss W.D., and Cureton T.K. Relationship of selected tests with energy metabolism and swimming performance. Research Quart., 1955, 26 : 205-221

- Holmer I. Physiology of swimming man. Acta Physiol. Scand. Suppl., 1974, 407 :9-47.

- Howley E.T., Bassett D.R. Jr, Welch HG. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. Med Sci Sports Exerc. 1995, 27: 1292-1301.

- Liljestrand G., et Stenstrom N.N. Scand. Arch. J. Physiol., 1919, XXXIX : 1
- Iwaoka K., Hatta H., Atomi Y., Miyashita M., Lactate, respiratory compensation thresholds, and distance running performance in runners of both sexes. Int J Sports Med. 1988, 9: 306-309.
- Jaak J., Kaja H., Antonio C., Evelin L., Priit P., Aire L., and Toivo J., Analysis of Swimming Performance From Physical, Physiological, and Biomechanical Parameters in Young Swimmers .Pediatric Exercise Science,2007,19, 70-81© 2007 Human Kinetics, Inc.
- Karpovich P.V. and Le Maitre H. Prediction of time in swimming breast stroke based on oxygene consumption. Research Quat., 1940, II: 40-44
- Karpovich P.V., Water resistance in swimming. Research Quart., 1933, 4 : 21-28
- Léger L., Médecine du sport, Elsevier Masson SAS. Partie II : Physiologie du sport, Chapitre 6 : Aptitude aérobie-Tests de terrain, 2013
- Laursen P.B., Shing C.M., Jenkins D.G., Reproducibility of the cycling time to exhaustion at .Y02peak in highly trained cyclists. Can J Appl Physiol. 2003, 28: 605-615.
- Lavoie J.M., Leger L.A., Leone M., et Provencher P.J., A maximal multistage swim test to determine the functional and maximal aerobic power of competitive swimmers. J. Swimming Research, 1985, 1 : 17-22.
- Liljestrand G., et Stenstrom N.N. Scand. Arch. J. Physiologie, 1919, XXXIX :1
- Luc A., Léger L., Vaclav S. and Brassard L., Backward Extrapolation of VO2 max values from the O2 recovery curve. Medecine and science in sport and exercice. Vol. 12, No.1, pp. 24-27, 1980



- McArdle W., Katch F., Katch Y., Physiologie de l'activité physique: énergie, nutrition et performance. 4e édition, Maloine/Edisem. 2001.
- Meyer K, Bücking, Exercise in heart Failure: Should aqua therapy and swimming be allowed? Med Sei Sports Exerc. 2004, 36: 2017-2023.
- Meyer T., Scharhag J., Kindermann W., Peak oxygen uptake. Myth and truth about an internationally accepted reference value. Z Kardiol. 2005, 94: 255-264.
- Montpetit R.R., Leger L.A., Lavoie J.M., et Cazorla G., V02 Peak during free swimming using the backward extrapolation of the O2 recovery curve. Eur. J. Appl. Physiol., 1981, 47 : 385-391
- Montpetit R.R., Lavoie J.M., et Cazorla G., Aerobic energy cost of swimming the front crawl at high velocity in international class and adolescent swimmers. Biomechanics and medicine in swimming. International Series on Sports Sciences. Huijing et de Groot (Eds), Human Kinetics Publishers, Champaign, Illinois, 1983, 14 : 228-234.
- Pendergast D.R., Di prampero P.E., Craig A.B., Wilson D.R., et Rennie D.W. Quantitative analysis of the front crawl in men and women. J. Appl. Physiol., 1977, 43 : 475-479.
- Platonov V.N. La adaptación en el deporte. Editorial Paidotribo. Barcelona Espana, 2da. Edicion, p, 68.1991.
- Protin L., Salem W., Étude et comparaison des paramètres cardio-respiratoires de la récupération après un effort aérobie et un effort anaérobie. Unité de recherche en anatomie, morphologie et biomécanique (Laboratoire de physiologie environnementale et occupationnelle) - Haute Ecole P.H. Spaak. 2009.
- Tortora G, Derrickson B., Principes d'anatomie et de physiologie. 2e édition, Éditions du renouveau pédagogique Inc. 2007.

- Wasserman K, Zhang YY, Gitt A, Belardinelli R, Koike A, Lubarsky L, Agostoni P.G. Lung function and exercise gas exchange in chronic heart failure. *Circulation*. 1997, 96: 2221-2227.

- Zhelyazkov T., Bases dei entrenamiento deportivo. Barcelona -Espafia. Editorial Paidotribo. 2001.

- Zintl F., Entrenamiento de la resistencia. Fundamentos, métodos y direccion dei entrenamiento. Barcelona -Espafia. Ediciones Martinez Roca., S.A. 1991.